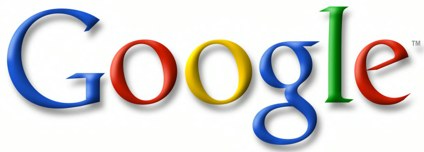



1837
ARTES
SCIENTIA
VERITAS
LIBRARY OF THE
UNIVERSITY OF MICHIGAN
E PLURIBUS UNUM
TUEBOR
SI QUAERIS PENINSULAM AMOENAM
CIRCUMSPICE



LEICHTFASSLICHE VORLESUNGEN

ÜBER

ELEKTRIZITÄT UND LICHT

VON

DR. G. JAUMANN,

O. Ö. PROFESSOR DER PHYSIK A. D. DEUTSCHEN TECHNISCHEN
HOCHSCHULE IN BRÜNN.

MIT 188 ABBILDUNGEN IM TEXT.



LEIPZIG
VERLAG VON JOHANN AMBROSIUS BARTH
1902

Druck von Metzger & Wittig in Leipzig.

MEINER LIEBEN FRAU

TITINE ALIX

ZUM DANK FÜR IHR INTERESSE
UND IHRE EIFRIGE HILFE.

VORWORT.

Die Anregung zu diesem Buche gaben volkstümliche Universitätsvorlesungen, welche ich in Prag in den Jahren 1899 und 1900 abhielt. Dasselbe verfolgt das Ziel, Anfänger an Hochschulen in die schwierige Maxwell-sche Theorie einzuführen und Lehrern an Mittelschulen bei ihren Bemühungen, den Unterricht modern zu gestalten, einige Hilfe zu bringen. Mit Rücksicht auf diese Leser wurde eine ausführliche Einleitung über die stationäre Wasserströmung vorangestellt. Diese kann jedoch von Lesern, welche sich auf ein eingehendes Studium nicht einlassen können, ganz überschlagen werden.

Die Darstellung bleibt bei aller Leichtfasslichkeit und gedrängten Kürze stets in strengem Anschlusse an die Faraday-Maxwell'sche Theorie. Manches, was in den älteren Darstellungen die Grundlage der Elektrizitätslehre zu bilden schien, verdient gegenwärtig in einem elementaren Lehrbuche kaum mehr eine Erwähnung, und manches, was früher kaum den Fachleuten verständlich

war, muss nun in den Beginn des Unterrichtes gestellt werden. Nur auf die allerdings neuen, aber reaktionären Jonen-, Elektronen- und sonstigen Corpusculartheorien habe ich keine Rücksicht genommen, sondern habe ruhigen Gewissens meinen eigenen theoretischen Vorstellungen den Vorzug gegeben.

Tetschen, Villa Schäffner, 21. Juli 1901.

G. Jaumann.

INHALT.

Einleitung.

Die stationäre Wasserströmung.

Erste Vorlesung.

Die magnetische Strömung.

Zweite Vorlesung.

Die elektrische Strömung.

Dritte Vorlesung.

Die elektrische Entladung.

Vierte Vorlesung.

Elektrische Wirbel. Der Volta'sche Strom.

Fünfte Vorlesung.

Die Elektrolyse. Der Peltiereffekt.

Sechste Vorlesung.

Der magnetische Wirbel des Volta'schen Stromes.

Siebente Vorlesung.

Die magnetische Quirlströmung.

Achte Vorlesung.

Die elektrische Quirlströmung.

Neunte Vorlesung.

Die elektromagnetischen Schwingungen.

Zehnte Vorlesung.

Die elektromagnetischen Wellen und die Hertz'schen Strahlen.

Elfte Vorlesung.

Das Licht.

Zwölfte Vorlesung.

Die elektromagnetischen Strahlen.

EINLEITUNG.

Die stationäre Wasserströmung.

§ 1. Wir wollen in den folgenden Vorlesungen die elektrischen und magnetischen Strömungen näher kennen lernen. Dieselben haben, wie ihr Name erraten lässt, eine gewisse Ähnlichkeit mit den Flüssigkeitsströmungen. Die Ähnlichkeit ist jedoch eine bloss äusserliche, sie bezieht sich auf den räumlichen Verlauf dieser drei als Strömungen bezeichneten Erscheinungen, welche ihrem übrigen Wesen nach ganz verschieden sind und auch einen ganz verschiedenen zeitlichen Ablauf zeigen.

Die wichtigste Begleiterscheinung der Flüssigkeitsströmungen ist die Bewegung der Flüssigkeit. Das Wasser, in welchem eine Wasserströmung vorhanden ist, zeigt die Richtung und Stärke der Strömung vor allem durch seine eigene Geschwindigkeit an. Wenn hingegen in dem Wasser eine elektrische oder magnetische Strömung vorhanden ist, aber keine Wasserströmung, so bleibt (wie wir weiter unten erfahren werden) das Wasser voll-

kommen ruhig, gewinnt aber andere eigentümliche Eigenschaften und Wirkungen, nach welchen wir (in § 88 und § 115) die Richtung und Stärke der elektrischen und magnetischen Strömung beurteilen lernen werden. Der Name „Strömungen“ ist demnach für diese Erscheinungen nur in geometrischem Sinne bildlich gebraucht, wie man z. B. auch einen Gletscher, welcher doch fast unbewegt ist, als einen Eisstrom bezeichnet und zwar der Form seines Verlaufes wegen oder wie man von „Wellen, in welchen aufgelöstes Haar herabfliesst“ spricht und dabei nur an die Form aber nicht an eine Bewegung des Haares denkt.

Die elektrische und magnetische Strömung nimmt ihren räumlichen Verlauf nach geometrischen Gesetzen, von welchen die wichtigsten auch die Wasserströmung beherrschen. Zufolge dessen versteht man den Charakter der elektrischen und magnetischen Erscheinungen viel leichter, wenn man den Verlauf der Wasserströmungen studiert hat. Wir werden also unsere Vorlesungen nicht besser einleiten können, als mit einer eingehenden Beschreibung der Wasserströmung.

1. Die Stromfäden.

§ 2. Wir betrachten nur solche Fälle der Wasserströmung, in welchen das Strömungsbild unverändert (stationär) lange Zeit bestehen bleibt.

Fig. 1 stellt beispielsweise einen lehrreichen Fall einer idealen stationären Wasserströmung dar. In einem gleichmässig von links nach rechts (von West nach Ost) strö-

menden Flusse, welcher von oben, etwa von einer Brücke aus, betrachtet wird, befindet sich bei o_1 ein Wasserwirbel. Im Zentrum o_1 des Wirbels und noch an einer Stelle o_2 bleibt das Wasser dauernd in Ruhe.[1]) Überall

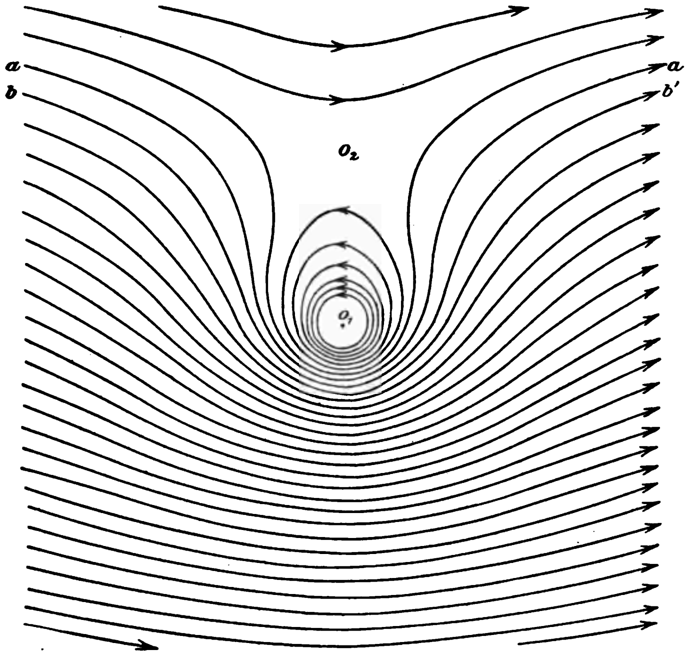


Fig. 1. Wirbel in einem von *W* nach *O* strömenden Flusse. o_1 und o_2 sind Ruhepunkte.

strömt es wie die dargestellten krummen Linien (Stromlinien) andeuten und in der Richtung der Pfeile. Geht man von o_2 in der eiförmigen Stromlinie um o_1 herum, so hat man ein Gebiet der Strömung umkreist, in

[1]) Genaues hierüber folgt in § 82.

welchem das Wasser nicht fortströmt, sondern in geschlossenen Ringen fliesst: das Gebiet des Wirbels. Ausserhalb desselben ist das Gebiet des fortfliessenden Stromes, welcher sich teilt und in krummen Linien dem Wirbel ausweichend an demselben vorbeifliesst.

Ungeachtet es sich um eine lebhafte Strömung, also eine Bewegungserscheinung handelt, verharrt das ganze Strombild einer stationären Strömung doch in völliger Ruhe. Man erkennt überhaupt nur an Nebenwirkungen (an der Bewegung kleiner in die Strömung geratener Körper, Luftblasen, Farbstoffe oder an sonstigen Unregelmässigkeiten der Strömung), dass das Wasser in Bewegung begriffen ist. Daher kommt es, dass manchmal ein gefrorener Wasserfall aus einiger Entfernung für einen stationär fliessenden Wasserfall gehalten werden kann.

§ 3. Um die Strömungen besser überblicken zu können, denken wir uns dieselben als die Vereinigung von vielen dünnen langen Wasserstrahlen oder Bächlein, welche man Stromfäden nennt, und deren krummliniger Verlauf auch in Fig. 1 ersichtlich gemacht ist. Die Stromfäden verlaufen neben einander wie die Fäden eines Garnsträhns, die Halme einer Getreidegarbe oder die Fasern eines Muskels, nur dass die Stromfäden von ihren benachbarten Stromfäden nur in der Vorstellung und in der Zeichnung getrennt werden können, wogegen die Garnfäden, Getreidehalme und Muskelfasern wirklich von einander geschieden sind.

In den beständigen oder stationären Strömungen ist

jeder Stromfaden ein unabhängiger dünner Bach, in welchem das Wasser fliesst ohne sich zu stauen und ohne in die nebenan verlaufenden Stromfäden überzutreten, denn dies würde die Ruhe des Strombildes sofort stören. Nun ist ein Stromfaden im allgemeinen (wie man auch in Fig. 1 erkennt) nicht seiner ganzen Länge nach gleichmässig dick, sondern er kann an einigen Stellen grossen an anderen Stellen kleinen Querschnitt haben. Und doch müssen durch jeden Querschnitt des Stromfadens gleichzeitig gleiche Wassermengen fliessen, wenn das Wasser stets den Stromfaden ganz erfüllt und nie in die benachbarten Stromfäden einbricht.

Betrachten wir einen bestimmten Stromfaden, z. B. jenen, welcher durch die Stromlinien *a a'* und *b b'* in Fig. 1 begrenzt wird. Beim Eintritte in die Figur, links bei *a b* ist der Stromfaden ziemlich breit und die Strömung von mittlerer Stärke. Dann biegt der Stromfaden südlich um den Wirbel herum, wobei er sehr eng wird. Das Wasser, welches durch den breiten Teil des Stromfadens heranfliesst, muss nun durch den engen Teil desselben weiterströmen. Wenn es sich in diesem engen Kanale nicht stauen und damit die ganze Strömung stören soll, so muss es in dem engen Teile des Stromfadens entsprechend rascher fliessen als in dem weiten Teile. Östlich von dem Wirbel finden wir den Stromfaden wieder breiter. Die Strömung verlässt also wieder langsamer fliessend die Figur rechts bei *a' b'*.

§ 4. Untersucht man die Strömung, welche in horizontalen Ebenen im Innern des Flusses unterhalb seiner

Oberfläche stattfindet, so kommt es oft vor, dass sich in diesen parallelen Ebenen ganz dieselbe Strömung wie an der Oberfläche findet. Solche Strömungen nennt man ebene oder geschichtete Strömungen, sie lassen sich sehr leicht vorstellen und durch eine ebene Figur abbilden. Wir werden deshalb, wo es angeht und ausreicht, öfter solche ebene Strömungen betrachten und abbilden, als Strömungen, welche nicht in Ebenen verlaufen und deren Stromfäden räumlich gekrümmt sind.

Ebene Strömungen denken wir uns stets zunächst in parallele Schichten von 1 cm Dicke zerlegt (Fig. 1 stelle eine solche Schicht vor) und zerlegen dann jede dieser Schichten nach den Stromlinien in Stromfäden. Jeder Stromfaden bildet dann ein Bächlein, welches überall genau 1 cm tief ist und überall der Zeichnungsebene parallel fliesst. Die Breite dieses Bächleins ist aber sehr verschieden, je nachdem die zwei Stromlinien, welche in der Zeichnung seine seitliche Begrenzung bilden, sich näher kommen oder grösseren Abstand haben.

§ 5. Ein Beispiel einer nicht ebenen Strömung bildet ein Bach, welcher in beliebigen Windungen, Stromschnellen und Wasserfällen dahinströmt. Erhält derselbe keine seitlichen Zuflüsse, so kann er als aus einem einzigen Bündel von Stromfäden bestehend gedacht werden, welche alle sich gleichen können und sämtlich so lang als der Bachlauf sind. Dort wo der Bach breit oder tief ist d. h. grossen Querschnitt hat, haben auch sämtliche Stromfäden grossen Querschnitt und ist also die

Strömung schwach.[1]) Dort aber, wo der Bach schmal oder seicht ist, müssen die Stromfäden eng und also die Strömung stark sein. Umgekehrt müssen dort, wo das Wasser rasch fliessen muss (z. B. an einer abschüssigen Stelle des Bachlaufes) alle Stromfäden und damit der Bach selbst kleinen Querschnitt haben.

2. Stärke und Geschwindigkeit der Strömung.

§ 6. Fassen wir ein Bündel oder eine Garbe von Stromfäden an irgend einer Stelle der Strömung durch ein gedachtes Band zusammen, so dass der ganze Querschnitt dieser Garbe an der Stelle des Bundes ein Quadratcentimeter Fläche hat.

Das Mass der Strömung an dieser Stelle ist unter allen Umständen die Flüssigkeitsmenge, welche in jeder Sekunde durch dieses 1 qcm umschliessende Band hindurchfliesst. Man kann jedoch diese Flüssigkeitsmenge nach dem Gewichte oder nach dem Hohlmass bemessen und dies giebt eine, wie wir bald einsehen werden, sehr wichtige Unterscheidung.

Als Stärke der Strömung bezeichnen wir die Flüssigkeitsmenge gemessen in Gramm, welche in jeder Sekunde durch den senkrecht zur Strömung gedachten Quadratcentimeter hindurchfliesst.

Als Geschwindigkeit der Strömung bezeichnen wir die Flüssigkeitsmenge gemessen in Kubikcentimetern,

---

[1]) Wenn ein Bach kein starkes Gefälle und überall gleiche Breite hat und in seinem ganzen Laufe kräftig strömt ausser an einer Stelle, wo das Wasser still fliesst, so ist es dort tief.

welche in jeder Sekunde durch den Quadratcentimeter senkrecht hindurchfliesst.

§ 7. Bei 4^0 C. wiegt 1 ccm Wasser gerade 1 g. Bei dieser Temperatur bedeutet also die Stärke und die Geschwindigkeit einer Wasserströmung ganz dasselbe. Bei jeder anderen Temperatur wiegt aber 1 ccm Wasser weniger als 1 g, weil sich das Wasser bei Temperaturänderung ausdehnt. Deshalb ist bei jeder anderen Temperatur die Stärke der Wasserströmung kleiner als ihre Geschwindigkeit und dieser Unterschied wird desto auffallender, je höher die Temperatur, je geringer also die Dichte des Wassers ist.

Noch auffallender ist dieser Unterschied für andere Flüssigkeiten. 1 ccm Quecksilber wiegt 13,6 g. Wenn also einige Kubikcentimeter Quecksilber durch 1 qcm senkrecht hindurchfliessen, so fliessen hiermit 13,6 Mal so viele Gramm Quecksilber hindurch. Die Stärke der Quecksilberströmung ist also 13,6 Mal grösser als die Geschwindigkeit dieser Strömung.

Wenn man die Zahl v, welche die Geschwindigkeit einer Strömung angiebt, mit der Dichte δ der Flüssigkeit (d. h. mit dem Gewichte eines Kubikcentimeters derselben) multipliziert, so erhält man die Zahl f, welche die Stärke dieser Strömung angiebt.

$$f = \delta \cdot v. \tag{1}$$

Die Geschwindigkeit v einer Strömung kann man leicht messen, indem man ein kleines Papierblättchen in die Strömung bringt. Dasselbe nimmt sogleich die

Geschwindigkeit der Strömung an. Bewegt es sich in einer Sekunde z. B. um 5 cm weiter, so fliessen dort 5 ccm der Flüssigkeit pro Sekunde durch 1 qcm und es ist $v = 5$ (Centimeter pro Sekunde).

§ 8. Um aus unseren Strombildern die Stärke f der Strömung leicht ersehen zu können, denken wir uns die Strömung stets derart in Stromfäden zerlegt, dass durch jeden Querschnitt jedes Stromfadens in jeder Sekunde je ein Gramm Flüssigkeit strömt.

Die Dicke (die Querschnittfläche) eines Stromfadens ist hienach nicht mehr willkürlich, sondern es gilt für alle Stromfäden an jeder Stelle der Strömung, dass je stärker die Strömung ist, desto dünner dort die Stromfäden sind. Fassen wir ein Bündel oder eine Garbe von Stromfäden durch ein gedachtes Band zusammen, so dass der ganze Querschnitt dieser Garbe an der Stelle des Bundes 1 qcm Fläche hat. Wären z. B. 23 Stromfäden nötig, um dieses Bündel zu bilden, so fliessen an dieser Stelle der Strömung pro Sekunde 23 g Flüssigkeit senkrecht durch (dieses) 1 qcm (umschliessende Band), denn durch jeden Stromfaden fliesst pro Sekunde 1 g, und also ist die Stärke der Strömung dort $f = 23$. Die Anzahl f der Stromfäden, welche an irgend einer Stelle durch 1 qcm senkrecht hindurch gehen, ist sonach gleich der Stärke f der Strömung an dieser Stelle.

In Fig. 1 sind z. B. die Stromfäden am untern Rande der Figur (südlich von dem Wirbel) sehr eng, eine grosse Anzahl derselben bildet erst einen Bund von 1 qcm

Querschnitt. Dort ist sonach die Stärke der Strömung gross. Auf der anderen (nördlichen) Seite des Wirbels haben die Stromfäden grossen Querschnitt, wenige derselben erfüllen schon 1 qcm, dort ist die Strömung schwach.

3. Die Strommenge eines Strombündels.

§ 9. Wir nennen die Flüssigkeitsmenge (in Gramm gemessen), welche durch irgend einen Querschnitt eines beliebig dicken Bündels von Stromfäden in jeder Sekunde fliesst, die Strommenge dieses Bündels.

Da durch jeden Stromfaden pro Sekunde 1 g fliesst, so ist die Strommenge jedes einzelnen Stromfadens gleich 1. Die Strommenge eines Bündels von n Stromfäden ist somit einfach gleich der Anzahl n der Stromfäden, aus welchen dieses Bündel besteht.

§ 10. Sehr oft, aber nicht immer, kann man das in Stromfäden zerlegte Bild der Strömung konstruieren. Im Allgemeinen aber wird man die Strommenge n nicht durch einfache Abzählung der Stromfäden bestimmen können, sondern muss dieselbe aus der beobachteten Stärke f, welche die Strömung besitzt, berechnen.

Wenn das Bündel von Stromfäden an einer Stelle q qcm Querschnitt hat und dort durch 1 qcm f Stromfäden hindurchgehen sollen, so bestimmt sich die Strommenge n des Bündels, d. h. die gesamte Anzahl n seiner Stromfäden durch:

$$n = q \cdot f = q \cdot \delta \cdot v. \tag{2}$$

Man kann durch direkte Beobachtung bestätigen, dass dieses Produkt für jeden Querschnitt eines Strombündels denselben Wert n hat, während die Faktoren q, δ und v die verschiedensten Werte haben können.

§ 11. Die Gleichung (2) kann man jedoch im Allgemeinen nur für dünne Strombündel verwenden. Ein dickeres Bündel muss man nach den Stromlinien in beliebige aber viele dünne Fasern zerlegen und für jede dieser Fasern nach (2) die Strommenge bestimmen. Die Summe dieser Strommengen ist dann die Strommenge des ganzen Strombündels. Ist jedoch in dem ganzen Querschnitte q eines dicken Strombündels die Stärke f der Strömung überall dieselbe, dann gilt auch für dieses dicke Strombündel die Gleichung (2).

4. Die Quellen und Senken.

§ 12. Besonderes Interesse hat die Strommenge des ganzen Bündels von Stromfäden, welches einer Quelle entströmt. In Fig. 2 ist eine stationäre Quellströmung dargestellt. In einem gleichmässig von Nord nach Süd strömenden seichten Flusse, welcher von oben betrachtet wird, tritt bei o_1 aus dem Flussgrunde eine Quelle ein. Dort und noch an einer Stelle o_2 fliesst das Wasser nicht mit dem Strome fort, sondern es hat in o_1 keine Horizontalbewegung und ruht in o_2 vollständig. Die thorförmige Stromlinie, welche durch o_2 geht, trennt das Gebiet der Quellströmung von dem Gebiete der Flussströmung. Die Quellströmung geht

[illegible]

Wenn nun die Wasserströmung durch eine [illegible]

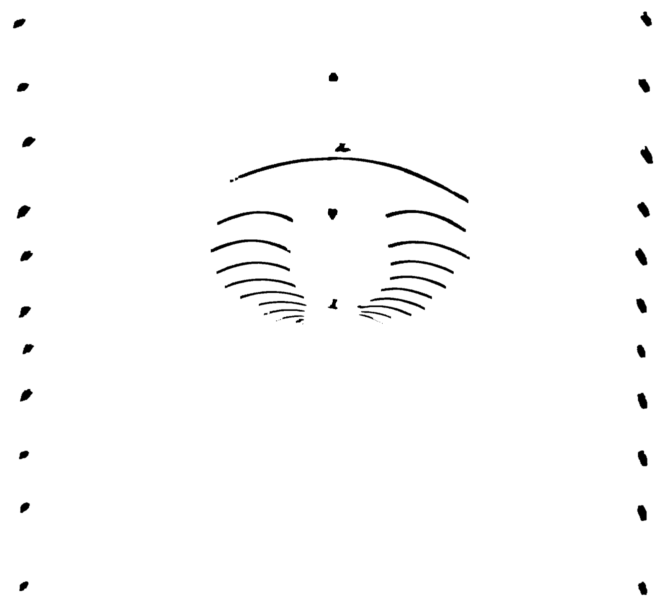


Fig. 2. [illegible] Quelllinie in einem von [illegible] nach [illegible] strömenden Flusse. [illegible] und [illegible] sind Ruhepunkte.

[illegible] Quellwasser nach allen Seiten in geraden Linien von der Quelle [illegible] Fig. 3. In beiden Figuren geben [illegible] von der Quelle aus [illegible] in jeder Sekunde [illegible] Wasser, die Strommenge der

Quelle ist 42 und bleibt immer dieselbe, ob der Fluss nun mitströmt oder nicht.

§ 13. Nun denken wir uns die Strömungsrichtung in allen Stromlinien beider Figuren entgegengesetzt (die Pfeile umgedreht). Sie stellen dann eine Senke der

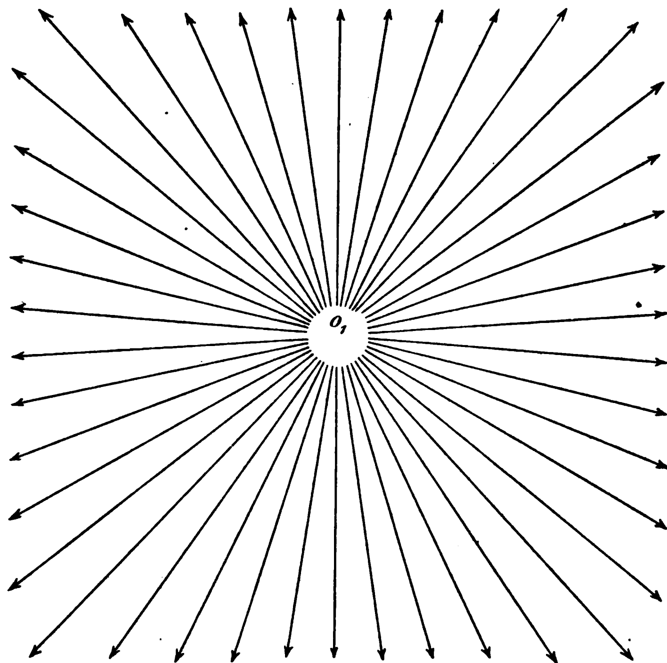


Fig. 3. Vertikale Quelllinie in einem Teiche.

Strömung dar. Das Wasser strömt von allen Seiten gegen die Senke o_1 zusammen und versinkt dort in ein Loch am Grunde des Flusses. In Fig. 2 kommt die Sinkströmung mit dem Flusse von Süden. Ihre mittleren Stromfäden fliessen direkt in die Senke, ihre seitlichen

Stromfäden fliessen aber eine kurze Strecke an beiden Seiten der Senke vorbei, biegen um und fliessen dann von Norden in die Senke.

§ 14. In der Nähe einer Quelle sowohl als einer Senke sind die Stromfäden notwendig eng zusammengedrängt, und deshalb ist dort die Strömung stark. Die Stromfäden sind jedoch desto mehr ausgebreitet, je weiter die Entfernung von der Quelle oder Senke ist, und also ist dort auch die Stärke der Strömung entsprechend kleiner. Während aber in Fig. 3 die Stromfäden mit wachsender Entfernung von der Quelle o_1 immerzu breiter werden, die Strömung also immerzu schwächer wird, ist dies in Fig. 2 nicht zu bemerken. Die Stromfäden werden zwar anfangs in der Nähe von o_1 rasch breiter, dort aber, wo die Quellströmung bereits mit dem Flusse nach Süden fliesst, erhalten alle Stromfäden der Quelle eine gleichmässige Breite, welche sich nicht mehr ändert und sie sind und bleiben dann ebenso breit, als die neben ihnen verlaufenden Stromfäden der Flussströmung. In grösserer Entfernung von der Quelle hat und behält also die Quellströmung dieselbe Stärke wie die Flussströmung.

§ 15. Man kann Fig. 2 und Fig. 3 auch als das Bild einer Schichte einer ebenen Strömung (siehe § 4) betrachten. Die Quellströmung geht dann von einer geraden Linie nach allen Seiten aus, welche Quelllinie in o_1 die Zeichnungsebene senkrecht durchbricht.

Führen wir mittelst eines dünnen Schlauches das Quellwasser bis zu einem Punkte im Innern der Fluss-

strömung, so strömt dasselbe von diesem Punkte (Quellpunkt) nach allen Seiten nicht nur horizontal, sondern auch nach oben und unten fort. Die Strömung ist dann keine ebene, sondern ihre Stromlinien bilden zusammen ungefähr die Gestalt eines Federbusches und man erhält sie, wenn man die Fig. 2 um die Linie $o_1 o_2$ gedreht denkt.

5. Geometrische Beziehung zwischen Quellen und Wirbeln.

§ 16. So eigentümlich die in Fig. 1 und 2 dargestellten Stromlinien erscheinen, so ist doch ihr Verlauf leicht zu berechnen und wir werden schon in § 24 lernen, diese Stromlinien zu konstruieren. Es sind höchst einfache geometrische Gesetze, welche die stationäre Wasserströmung beherrschen und wir dürfen uns nicht wundern, wenn wir dieselben Gesetze auch den räumlichen Verlauf anderer Erscheinungen z. B. der elastischen Spannung, der elektrischen und magnetischen Erscheinungen beherrschend finden.

Um das bekannteste Beispiel herauszugreifen, sei auf die Ähnlichkeit hingewiesen, welche Fig. 1 und Fig. 2 mit der Strukturzeichnung auf dem Querschnitte eines alten Baumstammes haben, in welchen ein Ast o_1 eingewachsen ist. Decken wir Fig. 2 so über Fig. 1, dass die Punkte o_1 bezw. o_2 zusammenfallen, so erhalten wir Fig. 4. In derselben stellen die voll ausgezogenen der Fig. 1 entnommenen Linien die Jahresringe der Holzfläche dar. Die gestrichelten der Fig. 2 entnommenen Linien stellen den Verlauf der kleinen Sprünge, Spiegel

und Markstrahlen in dem Holze dar. Alle voll ausgezogenen Linien des Wirbels Fig. 1 schneiden nun alle gestrichelten Linien der Quelle Fig. 2 senkrecht und zwar so, dass die Zeichnungsebene der Fig. 4 überall

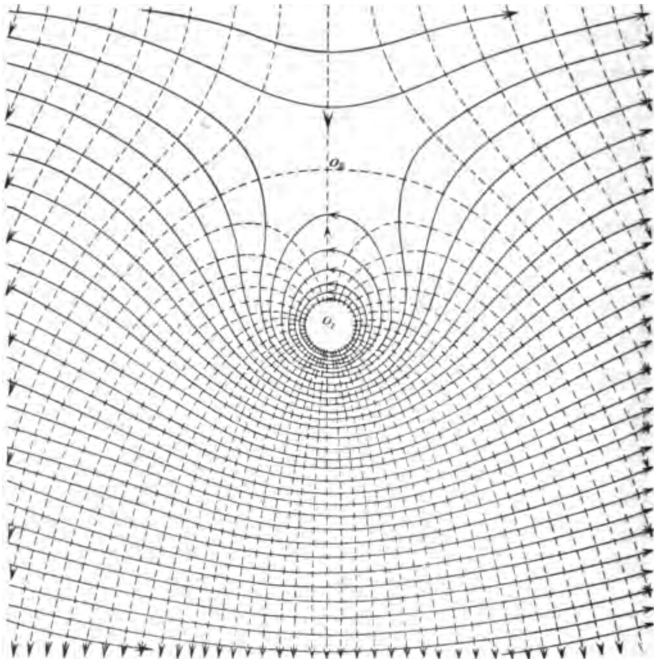


Fig. 4. Geometrische Beziehung zwischen ebenen Quell- und Wirbelströmungen.

(ausser in den Punkten o_1 und o_2) mit lauter kleinen Quadraten bedeckt erscheint.

So verschieden also die Strömungen Fig. 1 und Fig. 2 ihren Ursachen und ihrem Anblicke nach sind, so ist doch die Stärke der Strömung an jeder Stelle der Fig. 1

ebenso gross als die Stärke der Strömung an der entsprechenden Stelle der Fig. 2. Denn die Stromfäden sind, trotz ihrer sehr mannigfaltigen Gestalt und Breite an gleicher Stelle in beiden Figuren gleich breit, sonst würden sie Rechtecke aber keine Quadrate abgrenzen,

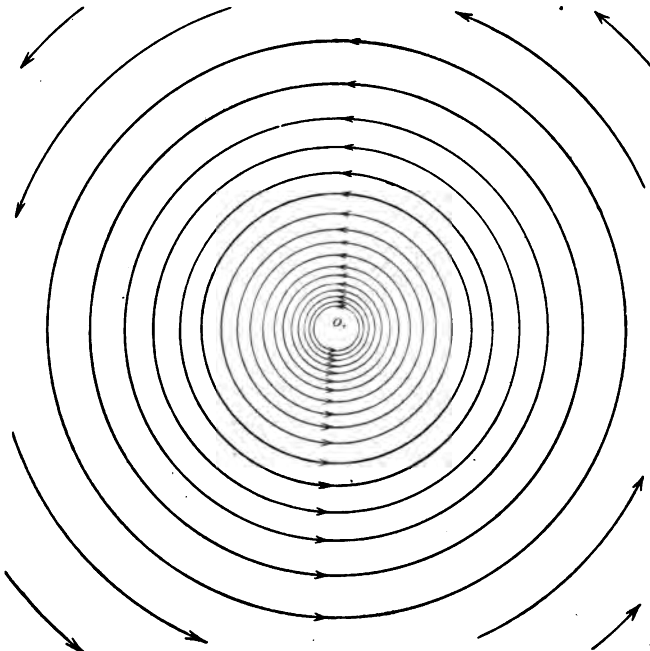


Fig. 5. Vertikale Wirbellinie in einem Teiche.

wenn man beide Figuren übereinander deckt. Man erhält also die Wirbelströmung Fig. 1, wenn man sich die Strömung in jedem kleinsten Gebiete der Quellströmung Fig. 2 ohne Änderung ihrer Stärke gegen den Sinn des Uhrzeigers um 90^0 gedreht denkt.

§ 17. Führen wir diese Drehung für die Quellströmung Fig. 3 aus, so erhalten wir die Fig. 5, welche die Stromfäden des Wirbels o_1 darstellt, wenn der in Fig. 1 von Westen kommende Fluss durch eine Schleuse abgesperrt würde. Diese Stromfäden Fig. 5 sind kreisförmig, und werden nach aussen hin immer breiter. Die Kreisströmung des Wassers ist im Zentrum o_1 des Wirbels sehr stark und wird nach aussen immer schwächer. Das Gesetz der Abnahme der Stärke der Strömung mit der Entfernung von der Wirbellinie Fig. 5 sowohl als von der Quelllinie Fig. 3 ist dasselbe. Deckt man Fig. 5 über Fig. 3, so dass die Punkte o_1 zusammenfallen, so wird die Zeichnungsebene in lauter (schwach krummlinige) Quadrate zerlegt.

Diese einfache Beziehung zwischen Wirbel- und Quellströmungen gilt nur für ebene Strömungen, für diese aber ganz allgemein.

6. Die Wirbelringe.

§ 18. Die geraden Quelllinien und Wirbellinien, wie überhaupt alle genau ebenen Strömungen sind streng genommen nicht herstellbar, doch sind sie nützliche Abstraktionen.

Den eigentlichen Typus der Wirbelströmungen stellen die Wirbelringe dar. Man kann einen solchen Wirbelring leicht erzeugen, indem man einen Tropfen (gefärbten) Wassers auf eine ruhige Wasseroberfläche legt. Dieser Tropfen fliesst sogleich auseinander und verwandelt sich in einen Wirbelring, welcher untertaucht und sich senk-

recht von der Wasseroberfläche entfernt, dabei immer grösseren Durchmesser annimmt, endlich aber platzt und sich in eine Schar kleiner Wirbelringe auflöst, welche wieder sogleich ihr Wachstum beginnen, d. h. ihren Durchmesser vergrössern. Auch die bekannten Rauchringel sind Wirbelringe der Luftströmung.

§ 19. In einem Wirbelring befindet sich die Flüssigkeit in einer erstaunlich raschen Kreisströmung, aber sie strömt nicht etwa in der Ebene des Wirbelringes, nicht längs des Umfanges des Wirbelringes, sondern die ringförmigen Stromlinien verlaufen in Ebenen, welche senkrecht auf der Ebene des Wirbelringes stehen und radiale Richtung haben (durch den Mittelpunkt des Wirbelringes gehen). Denken Sie sich viele Räder auf einem Seile aufgereiht, welches durch die Naben der Räder gezogen ist und dessen Enden dann zusammengeknüpft werden. Dieses ringförmige Seil stelle die Mittellinie des Wirbelringes dar. Denken Sie diese Räder ferner in rapider Drehung um ihre Achse, welches durch das Seil vorgestellt wird, so haben Sie eine Vorstellung von der in einem Wirbelring herrschenden Bewegung.

§ 20. Der radiale Querschnitt eines Wirbelringes ist in Fig. 6 dargestellt. Die zwei schraffierten Kreisflächen stellen den Querschnitt durch den eigentlichen Wirbelring dar, welcher z. B. aus gefärbten Wasser (§ 18) besteht. Das Wasser strömt heftig in den in Fig. 6 dargestellten nahezu kreisförmigen Stromfäden in der Richtung der Pfeile. An dieser Wirbelströmung nimmt nicht nur das gefärbte Wasser im Innern des Wirbelringes teil, sondern

auch das ungefärbte Wasser in der ganzen Umgebung des Wirbelringes. Man erhält ein Bild der ganzen Wirbelströmung, wenn man der Fig. 6 durch Drehung um die gerade Mittellinie *a a'* alle möglichen Orientierungen giebt.

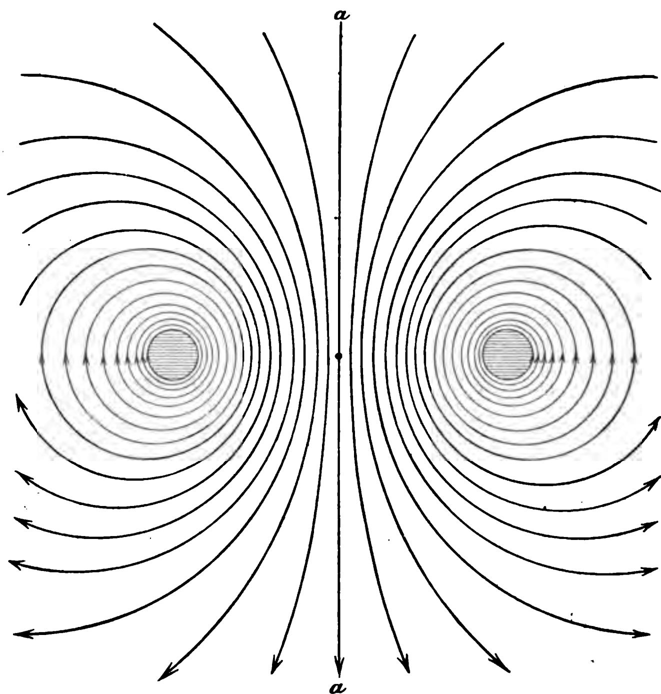


Fig. 6. Querschnitt durch einen Wirbelring.

Das Wasser strömt nach unten durch die ganze Öffnung des Wirbelringes hindurch, biegt dann federbuschartig nach allen Seiten um, strömt nun ausserhalb des Wirbelringes nach oben, sammelt sich oberhalb des Wirbelringes wieder federbuschartig, um dann abermals nach unten durch die

Öffnung des Wirbelringes zu strömen. An der Oberfläche des Wirbelringes sind wie man auch in Fig. 6 sieht, die Stromfäden am dünnsten, dort ist die Strömung sehr rasch. Sowohl weiter aussen als weiter innen ist aber die Strömung langsamer.

§ 21. Die Wirbelringe müssen nicht genaue Kreisform haben, sondern können beliebig gekrümmte Ringe darstellen, wie man an verzerrten Rauchringeln oft sieht, und sie brauchen auch nicht einen einfachen Ring vorzustellen, sondern der Ring kann an einer Stelle seines Umfanges in zwei Zweige gespalten sein. Dann besteht der verzweigte Wirbelring eigentlich aus zwei unverzweigten Wirbelringen, welche längs ihres übrigen Umfanges dicht aneinander liegen aber an einer Stelle von einander abgelöst sind.

Stets muss ein Wirbelring, welcher sich im Innern einer Flüssigkeit befindet, einen geschlossenen Ring bilden, welcher keinen Anfang und kein Ende hat.[1]) Man kann ihn nicht in zwei halbe Wirbelringe zerschneiden. Entweder stört ein mit einem Messer geführter Schnitt den Wirbelring überhaupt nicht merklich, oder er platzt, dann

---

[1]) Wenn wir ausnahmsweise auch die Oberfläche der Flüssigkeit in Betracht ziehen, so kann es allerdings halbe Wirbelringe geben, welche dann aber von einer Stelle der Oberfläche ihren Anfang nehmen und an einer anderen Stelle der Oberfläche ihr Ende haben müssen. Die Flüssigkeitsoberfläche bietet dann das Bild Fig. 6, man sieht nebeneinander zwei in entgegengesetzter Drehung befindliche Wirbel, welche die Endquerschnitte des unter der Oberfläche verlaufenden halben Wirbelringes sind. Auch in der Luft können halbe Wirbelringe auftreten, welche dann am Boden beginnen und enden. Man sieht an diesen beiden Enden des Wirbelwindes die trockenen Blätter oder den Staub am Boden sich nach Fig. 6 in zwei entgegengesetzten Wirbeln bewegen.

formen sich aber beide Hälften sogleich zu zwei ganzen geschlossenen Wirbelringen, ähnlich, wie sich die beiden Hälften eines zerschnittenen Polypen sogleich zu zwei ganzen wachstumsfähigen Polypen zusammenrollen.

7. Zusammensetzung zweier Strömungen.

§ 22. Denken Sie sich, dass im Norden und Westen einer Meeresbucht zwei Flüsse einmünden. Lässt man den nördlichen Zufluss einströmen, hält jedoch den west-

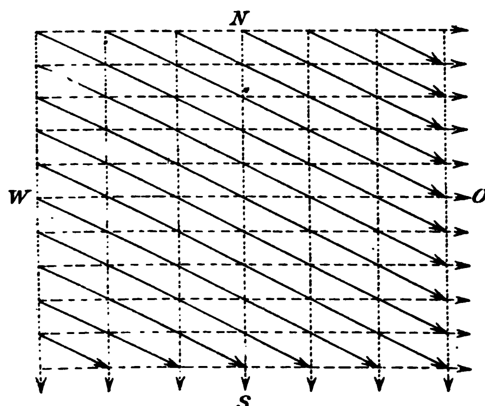


Fig. 7. Zusammensetzung zweier auf einander senkrechter Strömungen.

lichen Zufluss durch eine Schleuse auf, so strömt in einem kleinen Teile der Meeresbucht das Wasser in den in Fig. 7 durch punktierte Linien begrenzten Stromfäden von Norden nach Süden. Fliesst nur der Westfluss ein, so strömt das Wasser in den durch gestrichelte Linien begrenzten Stromfäden von Westen nach Osten. Diese Strömung möge stärker sein als die Nordströmung, ihre

Stromfäden sind also schmäler. Durch diese gekreuzten Stromfäden wird die Fig. 7 in kleine Rechtecke zerlegt.

Die voll ausgezogenen Diagonalen dieser Rechtecke begrenzen die Stromfäden der durch das gleichzeitige Auftreten der beiden Teilströmungen resultierenden Strömung. Diese ist also hier stärker als jede der beiden Teilströmungen, denn ihre Stromfäden erscheinen enger.

§ 23. Da die Teilströmungen von ihrer Flussmündung aus sich fächerartig ausbreiten, fliessen sie nicht an allen Stellen der Bucht genau senkrecht gegen einander. Wir setzen in Fig. 8 zwei Teilströmungen zusammen, deren Stromfäden wieder durch gestrichelte bezw. punktierte Linien begrenzt sind und schief gegen einander verlaufen. Durch dieselben wird die Figur in kleine schiefe Vierecke zerlegt. Die voll ausgezogenen Diagonalen begrenzen wieder die Stromfäden der resultierenden Strömung, welche hier sehr eng sind. Die resultierende Strömung ist also sehr stark, was leicht erklärlich ist, da die beiden Teilströmungen nahezu in derselben Richtung fliessen und sich daher gegenseitig verstärken. Würden sie genau in gleicher Richtung fliessen, so wäre die Stärke der resultierenden Strömung gleich der Summe der Stärken der beiden Teilströmungen.

In Fig. 9 sind dieselben zwei Teilströmungen zusammengesetzt, jedoch ist angenommen, dass die eine derselben in umgekehrter Richtung fliesst. In diesem Falle begrenzen die anderen Diagonalen der schiefen Vierecke die Stromfäden der resultierenden Strömung, welche sehr schwach

ist, weil ihre Stromfäden breit erscheinen. Thatsächlich schwächen sich die Teilströmungen gegenseitig, weil sie

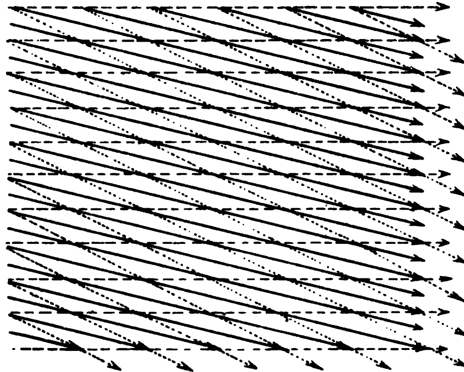


Fig. 8.

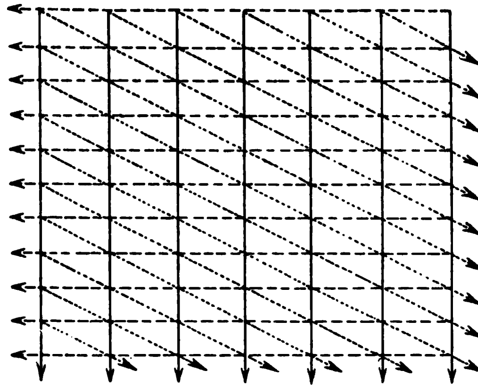


Fig. 9.

Fig. 8 und Fig. 9. Zusammensetzung zweier schief gegen einander verlaufenden Strömungen.

beinahe in entgegengesetzten Richtungen fliessen. Würden sie genau entgegengesetzte Richtung haben, so wäre die

Stärke der resultierenden Strömung gleich der Differenz der Stärken der Teilströmungen.

§ 24. Auf diese Weise kann man leicht die verschiedensten Strömungen zusammensetzen. In Fig. 10 ist

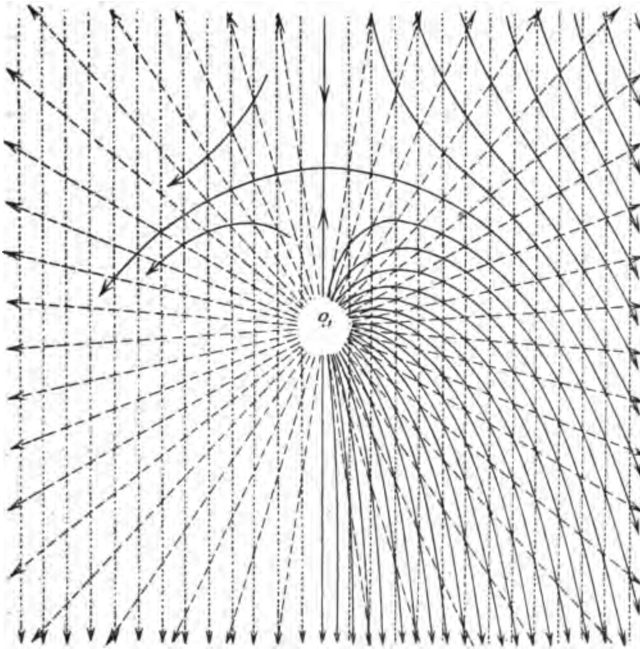


Fig. 10. Zusammensetzung einer Quellströmung mit einer Flussströmung.

die Quellströmung (Fig. 3) über die durch punktierte parallele Linien begrenzten Stromfäden eines gleichmässig von Norden nach Süden strömenden Flusses gedeckt. Zieht man die Diagonalen aller der schiefen Vierecke, in welche die Fig. 10 durch diese Teilströmungen zer-

legt wird, so erhält man die voll ausgezogenen krummen Linien, welche die Stromfäden der schon aus Fig. 2 bekannten resultierenden Strömung begrenzen.

In Fig. 5 sind die kreisförmigen Stromfäden eines Wirbels in einem stehenden Wasser dargestellt. Deckt man die von links nach rechts gerichteten geraden Stromfäden eines gleichmässig von West nach Ost strömenden Flusses über den Wirbel Fig. 5 und zieht nun die Diagonalen der kleinen schiefen und krummlinigen Vierecke, so erhält man die bereits aus Fig. 1 bekannten Stromfäden der resultierenden Strömung.

§ 25. Durch diese Konstruktion kann man aus zwei beliebigen Strombildern das genaue Bild einer neuen zusammengesetzteren Strömung erhalten. Der Leser mag versuchen, die Quellströmung Fig. 3 mit dem Wirbel Fig. 5 zusammenzusetzen, auch wenn Quellpunkt und Wirbelpunkt nicht zusammenfallen, oder was noch leichter ist, versuchen, die Quellströmung Fig. 3 zu der Strömung einer zweiten Quelle, welche von einem anderen Punkte der Zeichnungsebene ausgeht und nicht 42 sondern z. B. 16 Stromfäden aussendet, zu addieren. Die krummlinigen resultierenden Quellströmungen, welche er erhalten wird, gehen wieder in 42 bezw. 16 Stromfäden von den beiden Quellen aus, mischen sich aber nicht und kreuzen sich nicht, sondern weichen sich aus, so dass man das Gebiet der einen Quellströmung deutlich von dem Gebiete der anderen Quellströmung getrennt sieht.

8. Der Energiewert oder Arbeitswert der Strömung.

§ 26. Wir müssen nun den Geldwert einer Strömung feststellen und zwar keineswegs aus technischen oder wirtschaftlichen Rücksichten, sondern wegen des rein wissenschaftlichen Interesses, welches derselbe hat. Haben Sie die kleine Mühe nicht gescheut, sich klar zu machen, wie der Geldwert einer komplizierten Wasserströmung bemessen wird, so werden Sie damit auch einer unvergleichlich tieferen Einsicht in dem Verlauf der elektrischen und magnetischen Erscheinungen fähig.

Der Geldwert einer Strömung ist nämlich ihr „Energiewert" d. h. ihr Arbeitswert. Man kann eine Strömung des Wassers nicht erzeugen, ohne eine gewisse Arbeit zu leisten, und diese hat ihren Geldwert. Die Strömung repräsentiert nahezu denselben Geldwert, denn indem man sie aufhält, z. B. sie zwingt eine Turbine zu drehen, kann sie günstigen Falles wieder genau dieselbe Arbeit leisten, welche zu ihrer Herstellung nötig war. Gewöhnlich treten jedoch dabei Verluste ein, indem man statt Arbeit Wärme erhält. Dann tritt für jede verlorene Pferdekraftstunde (zu deren Herstellung man 3,3 kg Kohle im Werte von 2,7 Heller der Heizung einer Dampfmaschine zuführen muss) so viel Wärme auf als man durch Verbrennen von 80 g Kohle (im Werte von $^{2}/_{30}$ Heller) erzeugen könnte, d. i. ein Verlust von 97,5 $^{0}/_{0}$.

Der grösste Teil dieses Verlustes beruht auf der Unvollkommenheit unserer Dampfmaschinen. Aber auch aus prinzipiellen physikalischen Gründen ist es unmög-

lich, durch eine Heizung mit 80 g Kohle wieder eine volle Pferdekraftstunde zu erzeugen.

§ 27. Die Arbeit 10 Tonnen Wasser um 10 Meter höher zu pumpen oder zu heben hat gerade den Wert eines Hellers. So billig stellt sich die Arbeit grosser Dampfmaschinen. Wir werden es aber im Folgenden oft mit viel kleineren Arbeitswerten zu thun haben und führen mit Vorteil eine gewisse viel kleinere Münzeinheit als den Heller in die folgenden Rechnungen ein. Ein Sonnenstäubchen im Werte von 1 Zwanzigbillionstel Heller wollen wir ein Erg nennen.

Die Arbeit 1 g um $^1/_{1962}$ cm zu heben, hat genau den Wert von 1 Erg (oder kostet $^1/_{20000000000000}$ Heller). Die Arbeit, welche nötig ist, um 1 g um 1 cm zu heben, kostet also 1962 Erg.[1]

Wir können so leicht den Wert der Arbeit berechnen, welche nötig ist, um einen Kubikcentimeter einer Flüssigkeit, deren Dichte δ ist, welcher also δ Gramm wiegt, um eine Höhe von h Centimetern zu heben. Diese Arbeit kostet

$$1962 \cdot \delta \cdot h \text{ Erg}.$$

§ 28. Nun müssen wir untersuchen, welche Strömung eine Flüssigkeit annimmt, wenn sie aus einem höheren Reservoir R (Fig. 11) in ein tieferes um die Höhe h herabrinnt. Sie fliesse zunächst durch das Gefälle ab nach abwärts und nimmt dabei eine immer grössere Geschwindigkeit an. Der Strom, welcher in

[1]) Man bezeichnet gewöhnlich den doppelten Arbeitswert als 1 Erg. Es ist also 1 Erg = 2 Erg.

einem dicken Strahle über den Überfall *a* quillt, erhält deshalb während des Herabrinnens immer kleineren Querschnitt, die Stromfäden werden enger, da die Stärke der Strömung zunimmt. Endlich fliesst der Strom mit der bei *b* erlangten grössten Geschwindigkeit *v* in dem horizontalen Kanale *b c* weiter. Wie gross ist diese Geschwindigkeit *v*? Um diese zu bestimmen, kommt es gar nicht darauf an, welche Neigung und Krümmung das Gefälle *a b* hat, sondern nur darauf an, wie viel tiefer

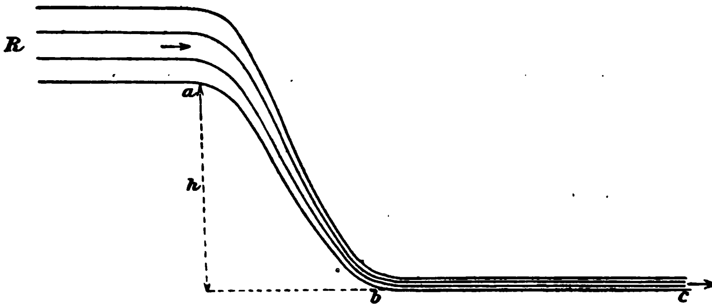


Fig. 11. Wasserfall.

der Kanal *b c* als des Flüssigkeitsniveau im Reservoir *R* liegt. Es gilt dieses Gesetz für fallende feste Körper ebenso wie für herabströmende Flüssigkeiten. Legt man z. B. neben dem Gefälle *a b* und dem Kanale *b c* Schienen und lässt einen Wagen herabrollen, so rollt dieser mit ganz derselben beschleunigten Bewegung durch das Gefälle wie die herabrinnende Flüssigkeit und läuft dann auf der horizontalen Strecke *b c* mit derselben Geschwindigkeit *v*, wie die Flüssigkeit in dem Kanale *b c*. Auch ein frei fallender Stein nimmt, wenn er um dieselbe

Höhe h (lotrecht) herabfällt, dieselbe Geschwindigkeit v an.

Das Gesetz dieses freien Falles ist uns aber wohl bekannt, die Geschwindigkeit des fallenden Körpers nimmt in jeder Sekunde um 981 cm/sec. zu. Ist sie anfänglich gleich Null und nach t Sekunden gleich v, so gilt:

$$v = 981 \cdot t.$$

Die Höhe h, um welche der Körper während dieser Zeit herabfällt, ist gerade so gross, als hätte er sich während der ganzen Zeit t sec. gleichmässig mit der Geschwindigkeit $\frac{v}{2}$ bewegt, die er thatsächlich in der ersten Hälfte der Fallzeit noch nicht hatte, in der zweiten Hälfte der Fallzeit aber überschritt. Mit der Geschwindigkeit $\frac{v}{2}$ hätte er aber in t Sekunden den Weg:

$$h = \frac{v}{2} \cdot t$$

zurückgelegt. Verbinden wir diese zwei Gleichungen durch Multiplikation, so ergiebt sich:

$$v^2 = 1962 \cdot h.$$

Die gleiche Beziehung findet statt zwischen der Höhe h (in Centimetern zu messen), um welche das Reservoir R über dem Kanale bc liegt und der Geschwindigkeit v (nach § 6 zu messen), welche die Flüssigkeit in diesem Kanale erlangt.

§ 29. Multiplizieren wir die letzte Gleichung beiderseits mit der Dichte δ der Flüssigkeit und berücksichtigen,

dass nach Gleichung (1) die Beziehung $f = \delta \cdot v$ besteht, so erhalten wir

$$v \cdot f = 1962 \cdot \delta \cdot h \ \ldots \ \text{Erg.}$$

Auf der rechten Seite dieser Gleichung steht nun aber die Arbeit (gemessen in Erg), welche nach § 27 nötig ist, um 1 ccm dieser Flüssigkeit um h Centimeter zu heben. Fällt dieser Kubikcentimeter wieder um die gleiche Höhe herab, so erlangt er nach § 28 eine Strömung, welche die Geschwindigkeit v und somit die Stärke f hat. Die obige Gleichung gestattet also, aus der Geschwindigkeit v und Stärke f einer Strömung ihren Arbeitswert zu berechnen.

§ 30. Betrachten wir irgend ein Gebiet von Volumen 1 ccm, welche von einer stationären Strömung durchflossen ist. In dieses Raumgebiet fliesst einerseits stets neues Wasser ein und strömt andererseits wieder ab. Die Strömung, welche in diesem Kubikcentimeter vorhanden ist, hat dauernd die Geschwindigkeit v und dauernd die Stärke f, und repräsentiert also dauernd den Energiewert

(3) $$v \cdot f \ \text{Erg.}$$

Der Arbeitswert eines Kubikcentimeters irgend einer Strömung ergiebt sich in Erg durch das Produkt der Geschwindigkeit v und der Stärke f, welche die Strömung in diesem Kubikcentimeter hat.

Wir wollen beispielsweise berechnen, welchen Energiewert die Flussströmung innerhalb des Bassins eines Flussbades hat. Das Bassin sei 10 m breit, 10 m lang und

3 m tief. Der Fluss ströme mit der Geschwindigkeit $v = 500$ (cm pro Sekunde) durch dieses Bassin. Die Dichte des Flusswassers sei $\delta = 1{,}01$. Die Stärke der Strömung ist sonach $f = 505$. Jeder Kubikcentimeter des Bassins enthält also eine Strömung im Werte $v \cdot f = 252\,500$ Erg. Das Bassin hat aber einen Rauminhalt von 300 Millionen Kubikcentimetern, und der Arbeitswert der in dem ganzen Bassin vorhandenen Strömung ist also 75,75 Billionen Erg = 3,79 Heller.

Es begreift sich, dass die Strömung eines grösseren Flusses im Ganzen einen Energiewert von vielen Millionen Kronen hat.

9. Die Niveauflächen und Stromzellen.

§ 31. Eine Fläche, welche alle Stromfäden senkrecht schneidet, welche von allen Stromlinien senkrecht durchflossen wird, nennt man eine Niveaufläche.

Die Stromlinien, welche von einer punktförmigen Quelle ausgehen, sind gerade Linien, welche nach allen Seiten von dem Quellpunkte ausstrahlen. Jede um den Quellpunkt als Mittelpunkt beschriebene Kugelfläche, ist sonach Niveaufläche, denn sämtliche radienartige Stromlinien stehen auf allen diesen Kugelflächen senkrecht. Die Stromlinien, welche von einer linienförmigen Quelle ausgehen, sind gerade und stehen auf der Quelllinie, aber auch auf allen Cylinderflächen senkrecht, deren Achse die Quelllinie ist, welche Cylinderflächen also Niveauflächen sind. Die Stromlinien, welche eine gerade Wirbellinie (Fig. 5) umschlingen, sind Kreise und stehen

auf jeder Ebene, welche durch die Wirbellinie geht, senkrecht. Diese sämtlichen radialen Ebenen sind demnach Niveauflächen.

§ 32. Die Schnitte der Niveauflächen mit der Zeichnungsebene nennt man Niveaulinien. Fasst man in Fig. 4 die voll ausgezogenen Linien als die Stromlinien der Wirbelströmung Fig. 1 auf, so deuten die gestrichelten Linien (welche ja nach § 16 überall senkrecht durchschneiden) die Niveauflächen der Wirbelströmung an. Fasst man hingegen in derselben Fig. 4 die gestrichelten Linien als die Stromlinien der Quellströmung Fig. 2 auf, so stellen die voll ausgezogenen Linien die Niveaulinien dieser Quellströmung dar.

In dieser Weise können bei allen ebenen Strömungen die Stromlinien mit den Niveaulinien vertauscht werden. Man erhält so aus jedem gegebenen Strömungsbilde das Bild einer neuen: der „konjugierten“ Strömung. Hierbei erscheint an der Stelle jedes Quellpunktes der gegebenen Strömung ein Wirbelpunkt in der konjugierten Strömung und umgekehrt.

§ 33. Durch zwei benachbarte Niveauflächen wird eine Schicht (Niveauschicht) des durchströmten Raumes begrenzt, und aus jedem Stromfaden ein kurzes Stück herausgeschnitten, welches wir eine Stromzelle nennen. Jede Stromzelle bildet ein (gekrümmtes) Prisma, dessen Basis- oder Endflächen senkrecht von der Strömung durchflossen werden, während die Seitenkanten Stromlinien sind und die Seitenflächen der Oberfläche eines Stromfadens angehören. In einer Niveauschicht sind die

Stromzellen mit ihren Seitenflächen eng aneinander gefügt. Die End- oder Basisflächen sämtlicher Zellen bilden zusammen die zwei Niveauflächen, welche die Niveauschicht begrenzen. Die ganze Strömung kann durch viele in geringer Distanz von einander senkrecht durch die Stromlinien gelegte Niveauflächen in viele Niveauschichten zerlegt werden, wodurch jeder Stromfaden in ebenso viele Zellen zerlegt wird.

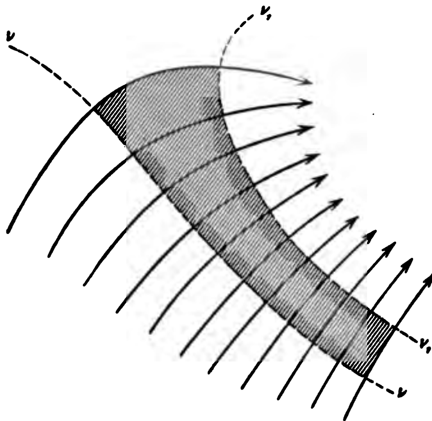


Fig. 12. Die Stromzellen in einer Niveauschicht.

Eine Stromzelle habe die Seitenlänge l Centimeter (längs einer Stromlinie gemessen) und die Basis- oder Querschnittsfläche q Quadratcentimeter und somit das Volumen $q \cdot l$ Kubikcentimeter. Ein Kubikcentimeter der Strömung hat aber nach Gleichung (3) den Energiewert $v \cdot f$. Der Energiewert e einer Stromzelle ist also:

$$e = qf \cdot vl \text{ Erg.} \tag{4}$$

10. Das normale Zellgewebe der Strömung. Die Spannung zweier Niveauflächen.

§ 34. Die sämtlichen Stromzellen, aus welchen ein Stromfaden (eine Zellreihe) besteht, haben, wie wir schon in § 3 erkannten, obgleich sie in jeder Beziehung verschieden gestaltet und verschieden stark durchströmt sein können, doch die gemeinsame Eigenschaft, dass, je grösser der Querschnitt q einer dieser Zellen, desto kleiner die Stärke f der Strömung in derselben ist. Man kann deshalb die ganze Strömung so in Stromfäden zerlegen, dass das Produkt qf für alle Stromzellen den Wert

$$qf = 1$$

hat. Wenn z. B. die Strömung in irgend einer Zelle die Stärke $f = 3$ zeigt, so hat die Zelle den Querschnitt $^1/_3$ Quadratcentimeter.

§ 35. Die sämtlichen Stromzellen, aus welchen eine Niveauschicht (eine Zellplatte) besteht, haben, obgleich sie sehr verschieden gestaltet und verschieden rasch durchströmt sein können, ebenfalls eine gemeinsame Eigenschaft. Je grösser die Länge l einer dieser Zellen ist, desto kleiner ist die Geschwindigkeit v der Strömung in derselben. Man kann deshalb die ganze Strömung in derartig enge Niveauschichten zerlegen, dass das Produkt vl für alle Stromzellen den Wert

$$vl = 1$$

hat. Wenn irgend eine Stromzelle die Länge $^1/_6$ Centimeter hat, so hat die Strömung in derselben die Geschwindigkeit $v = 6$ (cm pro Sekunde).

Es ist jedoch damit jede Willkür in der Wahl der Niveauflächen, mit Hülfe welcher wir die Stromfäden in Zellen zerschneiden, ausgeschlossen. Es gilt für alle Niveauschichten an jeder Stelle der Strömung, dass, je rascher die Strömung ist, desto kürzer dort die Stromzellen und desto enger deshalb dort die Niveauschichten sind.

In Fig. 4 sind z. B. die durch gestrichelte Niveaulinien begrenzten Niveauschichten am unteren Rande der Figur (südlich von dem Wirbel) sehr eng, dort ist die Geschwindigkeit v der Strömung gross. Auf der anderen, nördlichen Seite des Wirbels haben die Niveauschichten grosse Breite, dort fliesst die Strömung langsam.

§ 36. Hat man solche Niveaulinien für zwei verschiedene ebene Strömungen gegeben, so kann man sie übereinander decken und ebenso zu den Niveaulinien der resultierenden Strömung zusammensetzen, wie wir in § 24 die Stromlinien zweier Teilströmungen zusammengesetzt haben. Man hat also dieselben Vorteile für die Konstruktion der Niveaulinien einer komplizierteren Strömung, wie für die Konstruktion ihrer Stromlinien.

§ 37. Ein Stück eines Strombündels, welches aus n Stromfäden besteht, und welches durch zwei Niveauflächen v und v_1 (Fig. 13) abgeschnitten wird, so dass es N Niveauschichten enthält, heisst eine Strombahn. Eine Strombahn besteht also aus n Stromfadenstücken, von welchen jedes eine Reihe von N Zellen bildet oder anders: sie besteht aus N Niveauschichtenstücken, von welchen jedes eine aus n Zellen zusammengesetzte Platte bildet. Eine Strombahn bildet stets einen (gekrümmten)

Strang, dessen Basis- oder Endflächen senkrecht von der Strömung durchflossen werden, während die seitliche Oberfläche von Stromlinien gebildet wird.

Wir haben die Anzahl n der Stromfäden eines Strombündels die *Strommenge* n desselben genannt.

Die Zahl N der Niveauschichten, welche zwischen zwei Niveauflächen liegen, nennen wir die *Spannung* N der beiden Niveauflächen.

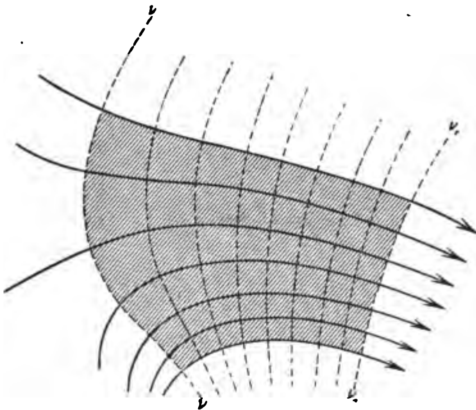


Fig. 13. Strombahn aus 6 Stromfäden und 8 Niveauschichten bestehend.

§ 38. Betrachten wir irgend ein Stromfadenstück, welches von der einen bis zu der anderen Niveaufläche reicht und also aus N Zellen besteht. Für jede dieser Zellen ist $v\,l = 1$ und also $N = v \cdot N l$. Wir beziehen diese Gleichung weder auf die kürzeste noch auf die längste unter den Zellen dieser Reihe, sondern auf jene Zelle, welche gerade die mittlere Länge l hat, so dass $N l$ die Länge der ganzen Zellreihe ist. Es ist sonach

die Spannung N zweier Niveauflächen gleich der Länge eines beliebigen von der einen bis zur anderen Fläche reichenden Stromlinienstückes multipliziert mit der mittleren Geschwindigkeit, welche die Strömung in diesem Stromlinienstücke hat. Man kann hiernach die Spannung zweier Niveauflächen berechnen, auch wenn die Strömung noch nicht in Stromzellen zerlegt vorliegt.

§ 39. Da für jede Stromzelle $qf = 1$ und ausserdem $vl = 1$ ist, so hat nach Gleichung (4) jede Stromzelle den Energiewert 1 Erg.

Der Energiewert eines beliebigen Gebietes der Strömung ist demnach einfach gleich der Anzahl der in demselben vorhandenen Stromzellen.

Der Energiewert einer Strombahn, welche aus n Stromfäden à N Zellen, also aus $n \cdot N$ Zellen besteht, beträgt sonach $n \cdot N$ Erg, d. h. er ist gleich dem Produkte aus ihrer Strommenge n und der Spannung N ihrer Endflächen.

§ 40. Da für jede Stromzelle $qf = vl$ ist, so gilt (da $f = \delta v$) für jede Stromzelle:

$$\delta q = l$$

d. h. je länger eine Stromzelle ist, desto grösser ist auch ihr Querschnitt, vorausgesetzt, dass die Dichte δ der Flüssigkeit in allen Stromzellen dieselbe ist. Die Stromzellen einer ebenen Strömung müssen, wenn $\delta = 1$ ist, ebenso lang als breit sein, so dass das Strombild durch die Stromlinien und Niveaulinien in lauter kleine Quadrate zerfällt.

Die Form der Stromzellen muss sich jedoch modifizieren, wenn die Flüssigkeit an verschiedenen Stellen des durchströmten Raumes verschiedene Dichte δ hat. Je grösser die Dichte δ ist desto länglicher, je kleiner die Dichte δ ist desto gedrungener sind alle Stromzellen.

Über die absolute Grösse, welche die Stromzellen erreichen, ist damit gar nichts ausgesagt. Diese hängt ausschliesslich von der Stärke und Geschwindigkeit der Strömung ab. In der langsamsten und schwächsten Strömung erreichen die Stromzellen das grösste Volumen, in heftiger Strömung sind sie sehr klein und zahlreich.

Die Form der Zellen, ob sie als abgeplattete Tafeln oder als fadenförmige Prismen auftreten, hängt hingegen gar nicht von der Strömung ab, sondern ausschliesslich von der spezifischen Eigenschaft δ der Flüssigkeit, welche die Zellen erfüllt. Wir wollen in dem nächsten Kapitel diese spezifische Verschiedenheit der Zellformen an einigen Beispielen kennen lernen.

Die Formen der Stromzellen und ihre Anordnungen zu dem gesamten Bilde der Strömungen haben einige Ähnlichkeit mit den Formen der organischen Zellen und der Struktur der primitivsten organischen Zellgewebe, nur dass die Stromzellen von ihren benachbarten Stromzellen nur in der Vorstellung und in der Zeichnung getrennt werden können, während die organischen Zellen wirklich von einander fast völlig geschieden sind. Die Ursache dieser Ähnlichkeit von Gebilden, welche ihrem Wesen nach so verschieden sind, wurde bereits in § 16 hervorgehoben.

Die hier mitgeteilten Gesetze über die Anordnung und die Eigenschaften der Stromzellen erleiden Ausnahmen im Innern der Quellgebiete und im Innern der Wirbelringe, wo das Zellgewebe eine wesentlich andere Struktur hat, welche wir jedoch erst in § 64 und § 65 beschreiben werden.

11. Die Wasserströmung in ungleichartigen Raumgebieten.

§ 41. Ein Fluss ströme von West nach Ost und habe überall gleichen Querschnitt, es sind dann auch die Stromfäden desselben (Fig. 14) überall gleich breit. Es

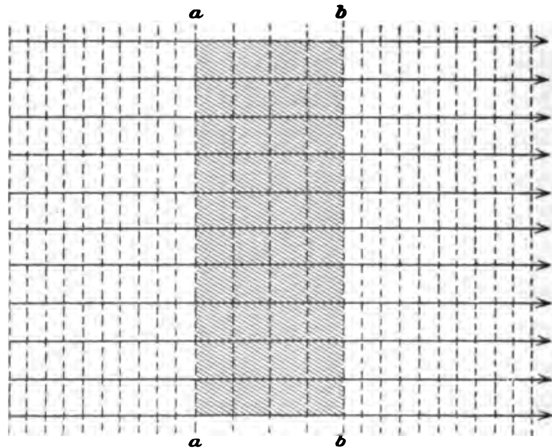


Fig. 14. Fluss senkrecht durch Schattengrenzen fliessend.

liege ferner eine Strecke des Flusslaufes (von *a* bis *b*) im Schatten (z. B. im Schatten einer Brücke), während der übrige Flusslauf von der Sonne kräftig bestrahlt wird.

Die Stärke *f* der Strömung muss überall dieselbe

sein, durch jeden Querschnitt jedes Stromfadens muss überall, im Schatten wie in der Sonne pro Sekunde je 1 g Wasser fliessen, wenn sich der Fluss nicht aufstauen soll.

An der Sonne wird jedoch das Wasser wärmer, dehnt sich aus und habe die Dichte δ_1. Im Schatten wird es wieder kälter und erlangt die grössere Dichte δ_2. Gerade weil nun überall die gleiche Gewichtsmenge stromab fliessen muss, strömt im sonnigen Gebiete ein grösseres Volum des Wassers als im Schatten. Die Geschwindigkeit v_1, welche das Wasser im Sonnenschein hat, ist grösser als die Geschwindigkeit v_2 desselben im Schatten. (Vergl. § 6.)

Es ist nach Gleichung (1) in der Sonne: $f = \delta_1 v_1$ und im Schatten $f = \delta_2 v_2$ und es besteht somit die Proportion:

$$v_1 : v_2 = \delta_2 : \delta_1 .$$

Die (gestrichelten) Niveaulinien (Fig. 14) müssen deshalb in der Sonne enger zusammengedrängt, die Stromzellen also bei gleichem Querschnitt kürzer sein als im Schatten. Die Stromzellen in dem weniger dichten Wasser haben hier wie immer eine mehr gedrungene Form, die Stromzellen in der rascheren Strömung haben ein kleineres Volumen.

§ 42. Ein Fluss ströme von Nord nach Süd (Fig. 15) und sei längs seiner beiden Ufer schattig, während ein Streifen längs der Mitte des Flusses (von *a* bis *b*) besonnt ist. Die (gestrichelten) Niveaulinien verlaufen quer über den ganzen Fluss und teilen alle Stromfäden in gleich viel Zellen, jede im Werte von 1 Erg. Da somit

diese Stromzellen überall gleich lang, die Niveauschichten überall gleichmässig dick sein müssen, so muss die Geschwindigkeit v der Strömung überall, im Schatten und in der Sonne, dieselbe sein. Es ist deshalb die Stärke f_2 der Strömung an den schattigen Ufern ($f_2 = \delta_2 v$) entsprechend grösser als die Stärke f_1 der Strömung in der sonnigen Mitte des Flusses ($f_1 = \delta_1 v$). Die voll ausgezogenen Stromlinien müssen in den Schatten enger zu-

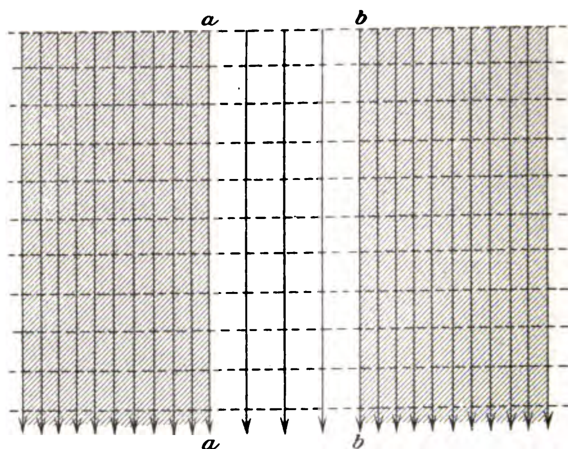


Fig. 15. Fluss parallel zu Schattengrenzen fliessend.

sammengedrängt, die Stromzellen also bei gleicher Länge kleineren Querschnitt haben als in der Sonne. Die Stromzellen in dem dichteren Wasser haben hier wie immer eine mehr längliche Form, die Zellen in der stärkeren Strömung haben das kleinere Volumen.

§ 43. Es ist leicht zu erkennen, dass man die Strömung Fig. 15 aus der Strömung Fig. 14 erhält, wenn man die Stromlinien mit den Niveaulinien vertauscht.

Beide Strömungen sind also zu einander konjugiert (§ 32). Es ist aber dabei auch das sonnige Gebiet mit dem schattigen vertauscht worden. Die Strecke zwischen den Niveaulinien *a* und *b* (Fig. 14) ist schattig und entspricht der Strecke zwischen den Stromlinien *a* und *b* (Fig. 15), welche sonnig ist.

Man kann so aus jeder beliebigen ebenen Strömung, welche durch Gebiete verläuft, in welchen das Wasser

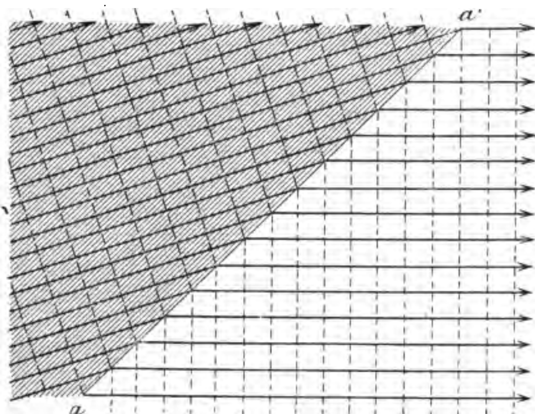


Fig. 16. Brechung der Stromlinien und Niveaulinien.

verschiedene Dichte hat, das Bild einer neuen (konjugierten) Strömung erhalten, indem man den Niveau- und Stromlinien die vertauschte Bedeutung beilegt. Es muss aber hiebei gleichzeitig das Verhältnis der Dichten, welche das Wasser in den verschiedenen Raumgebieten hat, umgekehrt angenommen werden.

§ 44. Endlich erörtern wir den Fall, dass die Strömung schief durch eine Schattengrenze (*a a'* Fig. 16)

fliesst. Es ist dabei die Geschwindigkeit des Wassers im Sonnenschein zwar grösser als im Schatten, aber nicht im selben Verhältnis wie sein durch die Erwärmung vergrössertes Volumen. Deshalb müssen in dem sonnigen Gebiete die Niveauschichten etwas enger sein, jedoch nicht so sehr zusammengedrängt als in Fig. 14. Dafür müssen aber auch die Stromfäden etwas dicker sein, wenn auch der Unterschied des Stromfadenquerschnittes in dem sonnigen und schattigen Gebiete in diesem Falle nicht so gross sein wird, wie in Fig. 15.

Dies ist nicht anders möglich, als wenn alle Linien an der Schattengrenze ihre Richtung ändern. Die Stromlinien und die Niveaulinien werden an der Schattengrenze abgelenkt und erscheinen geknickt oder gebrochen.

Um dies genauer einzusehen, denken wir uns die ankommende Strömung, soweit sie im Schatten verläuft, durch zwei Strömungen ersetzt, deren Stromfäden in Fig. 17 durch gestrichelte bezw. punktierte Linien begrenzt sind, und von welchen die eine der Schattengrenze parallel, die andere zu ihr senkrecht verläuft. Dass diese zwei Teilströmungen, wenn sie gleichzeitig vorhanden wären, die wahre Strömung des Wassers bewirken müssten, folgt aus § 22. Die (punktierten) Stromfäden jener Teilströmung, welche senkrecht zur Schattengrenze fliesst, setzen wir (wie in Fig. 14) einfach in das sonnige Gebiet hinein fort. Die (gestrichelten) Stromfäden jener Teilströmung, welche in dem sonnigen Gebiete parallel zu der Schattengrenze fliesst, müssen hingegen weiter sein als die Stromfäden der parallelen Teilströmung

im Schatten (so wie in Fig. 15). So haben wir beide Teilströmungen in das sonnige Gebiet fortgesetzt. Setzen wir dieselben nun nach § 22 zusammen, so erhalten wir die voll ausgezogenen Linien, welche die Stromfäden der wirklich in dem sonnigen Gebiete auftretenden Strömung darstellen, und gegen die voll ausgezogenen Stromfäden der ankommenden Strömung abgelenkt oder gebrochen sind.

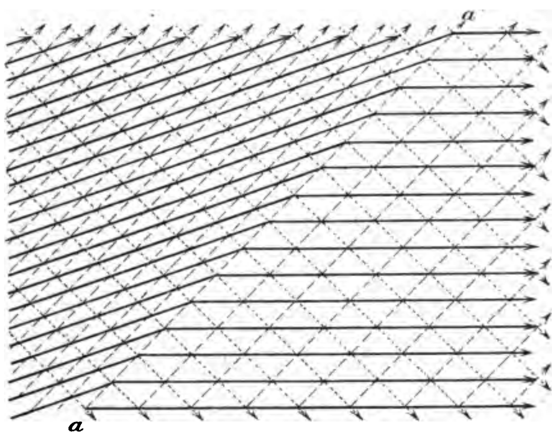


Fig. 17. Konstruktion der gebrochenen Stromfäden.

§ 45. Aus Fig. 16 ergiebt sich sofort der Verlauf einer Strömung, welche umgekehrt aus einem sonnigen Gebiete in ein schattiges fliesst. Wir brauchen entweder nur die Richtung der Strömung umgekehrt zu denken, oder aber wir können auch die zu Fig. 16 konjugierte Strömung (siehe § 43) ins Auge fassen. Es ist leicht zu erkennen, dass die Stromlinien, wenn sie aus dem dichteren Wasser in das dünnere übergehen zum Lote gebrochen werden, wogegen sie beim Übergange aus

weniger dichtem in dichteres Wasser vom Lote gebrochen werden. Unter Lot versteht man hier die Senkrechte auf die Trennungsfläche *a a'*.

§ 46. Fig. 18 zeigt das Zellgewebe der Strömung eines warmen Flusses, in dessen Mitte sich eine kreis-

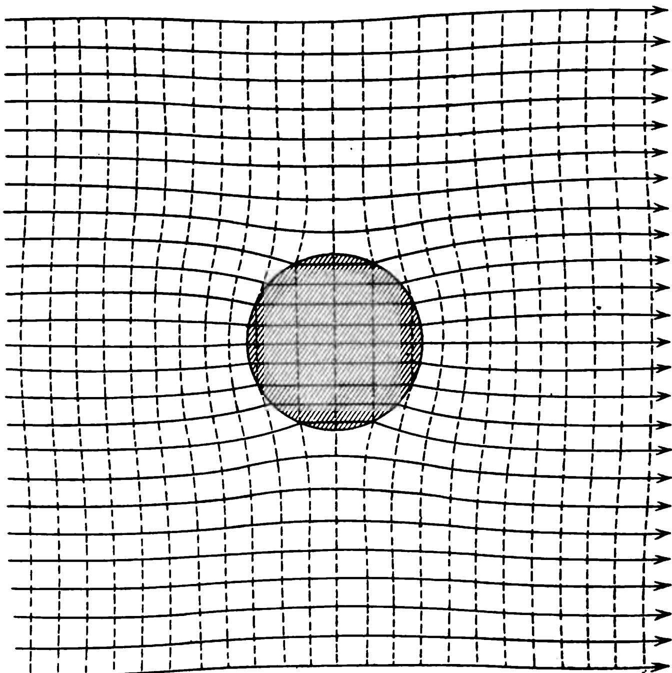


Fig. 18. Wolkenschatten auf einem sonnigen Flusse.

förmige kalte Stelle befindet. Man erkennt zunächst wieder die scharfe Brechung der Stromfäden an der Schattengrenze und ersieht, dass die Stromfäden in dem kälteren Wasser sich zusammendrängen. Die Strömung „bevorzugt“ den Weg durch das kältere Gebiet.

Die Strom- und Niveaulinien in dem kalten Gebiete sind in diesem Falle gerad, alle Zellen dieses Gebietes haben dieselbe längliche Form. Die Zellen des äusseren Gebietes sind hingegen von sehr ver-

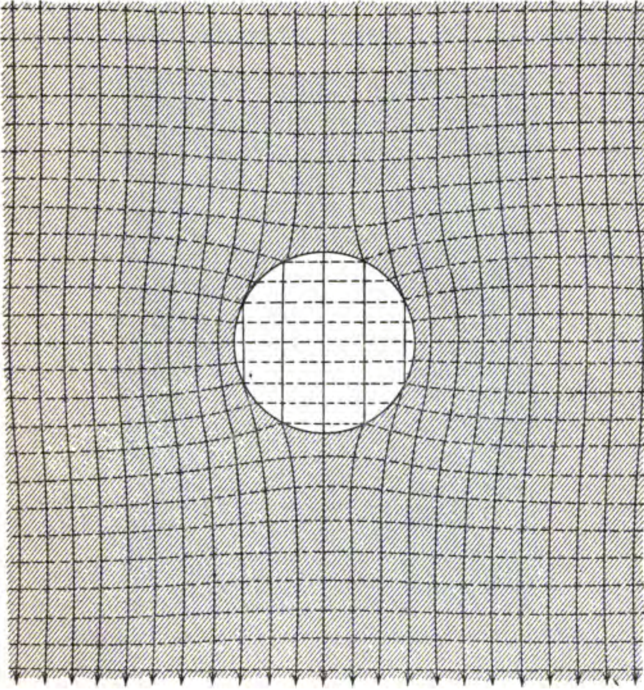


Fig. 19. Sonnige Stelle auf einem schattigen Flusse.

schiedener Grösse und krummlinig, aber alle von quadratischer Form.

Vertauscht man die Strom- und Niveaulinien und ausserdem Sonne und Schatten, so erhält man die konjugierte Strömung Fig. 19, deren Stromfäden der sonnigen

Stelle ausweichen, und neben derselben im Schatten sich zusammendrängen.

§ 47. Die Zusammenziehung (Fig. 18) bezw. Ausbreitung (Fig. 19) der Stromfäden entspricht ungefähr den Volumsänderungen des Wassers zufolge der Temperaturänderung. Man erkennt leicht, dass diese in Wirklichkeit nie so bedeutend sein wird, als in obigen Figuren der Deutlichkeit wegen angenommen wurde.

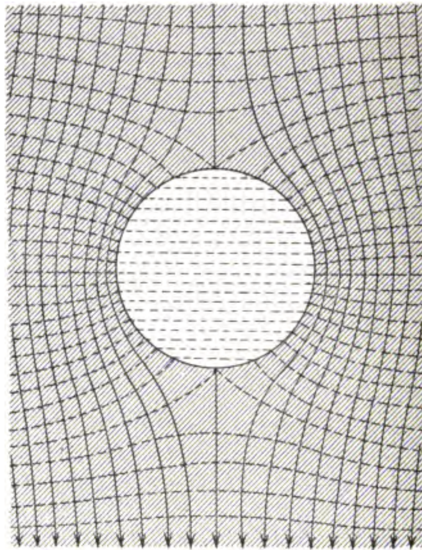


Fig. 20. Wasserdampfblase in strömendem Wasser.

Doch werden wir noch die extremen Fälle in Betracht zu ziehen haben. Falls die Dichte des Wassers in zwei Raumgebieten eine sehr grosse Verschiedenheit zeigt, so werden die Stromlinien an der Grenze dieser Gebiete so stark gebrochen, dass sie entweder in dem dünneren

Wasser zu der Grenzfläche senkrecht verlaufen, oder in dem dichteren Wasser zu der Grenzfläche parallel, längs derselben, verlaufen. Eine so enorme Dichteverschiedenheit kann das Wasser allerdings nur dann zeigen, wenn es in dem einen Gebiete als Flüssigkeit, in dem anderen als Dampf strömt. Fig. 20, welche das Extrem

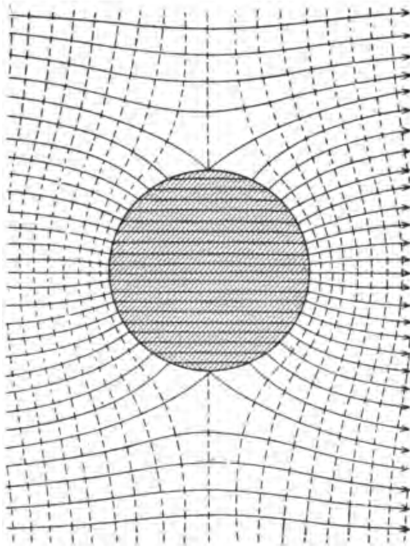


Fig. 21. Wassertropfen in strömendem Wasserdampf.

des in Fig. 19 dargestellten Falles bildet, zeigt wie das Wasser einer Wasserdampfblase ausweicht und längs der Oberfläche derselben vorbeiströmt.[1])

Die konjugierte Strömung Fig. 21, welche das Extrem des in Fig. 18 dargestellten Falles bildet, zeigt, wie

[1]) Die Bedingungen, welche erfüllt sein müssen, damit in stationär strömendem Wasser eine ruhende Dampfblase auftritt, lassen wir unerörtert.

strömender Wasserdampf den Weg durch einen Wassertropfen, in welchem er vorübergehend flüssigen Zustand annimmt, vorzieht. Er strömt einerseits senkrecht gegen die Oberfläche des Tropfens, andererseits senkrecht von dieser Oberfläche hinweg. Die Grenzfläche des Tropfens ist also für die äussere Strömung nahezu genau eine Niveaufläche.

12. Widerstand und Durchlässigkeit der Strombahnen.

§ 48. Alle Strömungen werden durch Quellen oder durch Wirbelringe verursacht. Nehmen wir an, dass diese Strömungsursachen ihre Lage und Form bewahren, jedoch sämtlich in einem beliebigen aber für alle gleichen Verhältnisse verstärkt werden und also eine heftigere Strömung hervorrufen. In diesem Falle würde die Strömung dennoch in genau denselben Stromlinien wie vorher fliessen und genau dieselben Niveauflächen haben. Aber die Stärke sowohl als die Geschwindigkeit der Strömung müsste entsprechend grösser werden, die Stromfäden sowohl als die Niveauschichten würden in demselben Verhältnisse zahlreicher und enger werden.

Untersuchen wir irgend eine Strombahn (§ 37) aus dieser Strömung, so finden wir dann sowohl die Zahl n der Stromfäden als die Zahl N der Niveauschichten dieser Strombahn im selben Verhältnis vermehrt z. B. beide Zahlen 5 Mal grösser geworden. Es behält also hiebei doch der Quotient $\frac{n}{N}$ seinen ursprünglichen Wert. Die notwendige und hinreichende Be-

dingung hierfür ist nur, dass die Strömung in denselben Stromlinien, durch dieselben Strombahnen fliesst. Der Quotient $\frac{n}{N}$ der Strommenge n und der Spannung N, welche eine Strombahn für irgend eine Strömung zeigt, ist ein für die Strombahn charakteristischer Wert, und ändert sich nicht, so lange die Strombahn ihre Form und die Flüssigkeit ihre Dichte δ nicht ändert, gleichgültig wie stark und rasch die Strömung fliesst.

Der Quotient $\frac{n}{N}$ heisst die Leitfähigkeit oder Durchlässigkeit D der Strombahn. Der umgekehrte Quotient $\frac{N}{n}$, welcher natürlich ebenfalls nur von der Form der Strombahn und der Dichte der Flüssigkeit abhängt, heisst der Widerstand W der Strombahn.

$$D = \frac{n}{N}; \qquad W = \frac{N}{n}.$$

Wir werden bald einsehen, wie vorteilhaft diese neuen Begriffe sind, und weshalb diese Quotienten solche Namen erhalten haben.

§ 49. Aus der obigen Definition folgt:

$$n = \frac{N}{W},$$

d. h. man kann die Strommenge n einer Strombahn, deren Widerstand W bekannt ist, aus der Spannung N ihrer Endflächen berechnen und umgekehrt.

§ 50. Da für jeden einzelnen Stromfaden $n = 1$ ist, so ist der Widerstand aller Stromfäden einer Strombahn gleich, und zwar $= N$.

Da ferner für jede einzelne Niveauschichte einer

4*

Strombahn $N = 1$ ist, so ist die Durchlässigkeit oder Leitfähigkeit sämtlicher Niveauschichten einer Strombahn gleich, und zwar $= n$.

Alle Stromzellen haben den Widerstand 1 und die Leitfähigkeit 1, da für sie $n = 1$ und $N = 1$ ist.

§ 51. Der Energiewert E der Strömung in einer Strombahn bestimmt sich nach § 39 durch:

$$E = N \cdot n \text{ Erg.}$$

Es folgt nun aus der Definition von W und D

$$E = n^2 \cdot W \text{ Erg und } E = N^2 \cdot D \text{ Erg,}$$

d. h. der Energiewert E einer Strombahn ist gleich dem Quadrate ihrer Strommenge n, multipliziert mit ihrem Widerstande W, oder auch gleich dem Quadrate der Spannung N ihrer Endflächen, multipliziert mit ihrer Durchlässigkeit D.

§ 52. Betrachten wir die Fortsetzung einer Strombahn (Fig. 13) über eine der Niveauflächen hinaus, welche wir bisher als Abschluss der Strombahn ansahen. Wir verlängern jeden Stromfaden der Strombahn Fig. 13 nach rechts durch N_1 weitere Niveauschichten hindurch. Das so hinzugefügte (hinter das erste geschaltete) Strombündelstück, besteht also wie das erste aus n Stromfäden, aber aus N_1 Niveauschichten und hat den Widerstand $W_1 = \frac{N_1}{n}$.

Beide Strombahnen zusammen genommen bestehen aus $(N + N_1)$ Niveauschichten und aus n Stromfäden. Der Widerstand der zusammengestückelten Strombahn ist also:

$$\frac{N + N_1}{n} = \frac{N}{n} + \frac{N_1}{n} = W + W_1,$$

d. h. der Widerstand zweier hinter einander geschalteter Strombahnen ist gleich der Summe der Widerstände dieser zwei Strombahnen. Es ist hierbei:

$$N_1 : N = \frac{N_1}{n} : \frac{N}{n} = W_1 : W,$$

d. h. die Spannungen N_1 und N der Endflächen zweier hinter einander geschalteter Strombahnen verhalten sich wie die Widerstände derselben.

§ 53. Belassen wir hingegen die zwei Niveauflächen, welche in Fig. 13 die Strombahn begrenzen, fassen wir aber ausser den n Stromlinien, aus welchen dieselbe besteht, noch n_1 Stromfäden hinzu, so haben wir eine Strombahn, welche aus $(n_1 + n)$ Stromfäden und aus N Niveauschichten besteht, und welche also die Durchlässigkeit:

$$\frac{n_1 + n}{N} = \frac{n_1}{N} + \frac{n}{N} = D_1 + D$$

hat. Der Quotient $\frac{n_1}{N} = D_1$ ist die Durchlässigkeit der Strombahn, welche aus n_1 Stromfäden und N Niveauschichten besteht und welche wir zu der Strombahn Fig. 13 hinzugefasst (neben dieselbe geschaltet) haben. Es folgt somit: die Durchlässigkeit zweier neben einander geschalteter Strombahnen ist gleich der Summe der Durchlässigkeiten D und D_1 dieser zwei Strombahnen. Es ist hierbei:

$$n_1 : n = \frac{n_1}{N} : \frac{n}{N} = D_1 : D,$$

d. h. die Strommengen n_1 und n in zwei neben einander

geschalteten Strombahnen verhalten sich wie die Durchlässigkeiten D_1 und D dieser Strombahnen. Die Strömung bevorzugt also von zwei Strombahnen jene, welche die grössere Leitfähigkeit oder Durchlässigkeit D hat. Daher diese Namen für den Quotienten $\frac{n}{N} = D$.

13. Bestimmung des Widerstandes einer Strombahn.

§ 54. Die wichtigen Gesetze, welche im vorigen Abschnitte abgeleitet wurden, gewinnen ihren Wert erst dadurch, dass man die Durchlässigkeit D und den Widerstand W jeder Strombahn aus ihrer Form und der Dichte δ der Flüssigkeit, berechnen kann, ohne eine von den Zahlen n oder N zu kennen.

Beschränken wir uns zunächst auf die Berechnung des Widerstandes einer Strombahn, welche (längs einer Stromlinie gemessen) die Länge L und überall gleichen Querschnitt Q hat. Diese bildet also einen cylindrischen, aber entsprechend dem Verlauf der Stromlinien gebogenen Strang, welcher ungefähr die Gestalt eines beliebig gebogenen Pflanzenstengels oder Drahtes hat.

Die Stromzellen in einer solchen Strombahn sind alle unter einander gleich. Denn einesteils sind alle Stromfäden cylindrisch und haben überall denselben Querschnitt q, andererseits habe die Flüssigkeit überall dieselbe Dichte δ, es muss also auch die Länge $l = \delta q$ (vergl. § 40) aller Stromzellen gleich sein.

Die Anzahl N der Zellen, aus welcher jeder Stromfaden besteht, ergiebt sich sonach einfach durch:

$$N = \frac{L}{l} = \frac{L}{\delta q}.$$

Die Anzahl n der Zellen, aus welchen sich eine Niveauschichte zusammensetzt, ergiebt sich durch:

$$n = \frac{Q}{q}.$$

Man erhält also:

(5) $$W = \frac{N}{n} = \frac{L}{\delta Q} \text{ und } D = \frac{n}{N} = \frac{\delta Q}{L}.$$

Der Widerstand W einer Strombahn ist desto grösser, je grösser ihre Länge L, je kleiner ihr Querschnitt Q und je kleiner die Dichte δ der Flüssigkeit ist. Die Leitfähigkeit oder Durchlässigkeit D einer Strombahn ist desto grösser, je kleiner ihre Länge L, je grösser ihr Querschnitt Q und je grösser die Dichte δ der Flüssigkeit ist.

Für Strombahnen, welche nicht ihrer ganzen Länge nach gleichmässigen Querschnitt Q haben und in welchen die Flüssigkeit nicht überall gleiche Dichte δ hat, muss man die mittleren Werte von Q und δ in der Gleichung (5) verwenden.

Wenn mehrere, ihrer Form und Dichte nach verschiedene, kleinere Strombahnen neben und hintereinander geschaltet sind, so kann man immer aus den Widerständen und Leitfähigkeiten derselben nach § 52 und § 53 den Widerstand der ganzen komplizierten Strombahn berechnen, wofür in § 57 ein Beispiel gegeben wird.

§ 55. Als spezifische Leitfähigkeit oder spezifische Durchlässigkeit des durchströmten Raumes bezeichnet man die Leitfähigkeit einer Strombahn, welche (längs der

Stromlinien gemessen) 1 cm lang ist und (längs der Niveauflächen gemessen) 1 qcm Querschnitt hat. Für diesen Centimeterwürfel ist $L = 1$ und $Q = 1$ somit nach Gleichung (5)

$$D = \delta.$$

Die spezifische Durchlässigkeit des durchströmten Raumes ist also einfach gleich der Dichte δ, welche die strömende Flüssigkeit in demselben hat.

14. Strömung in vorgeschriebenen Bahnen.

§ 56. Besonders brauchbar ist der Begriff des Widerstandes und der Leitfähigkeit der Strombahnen, wenn

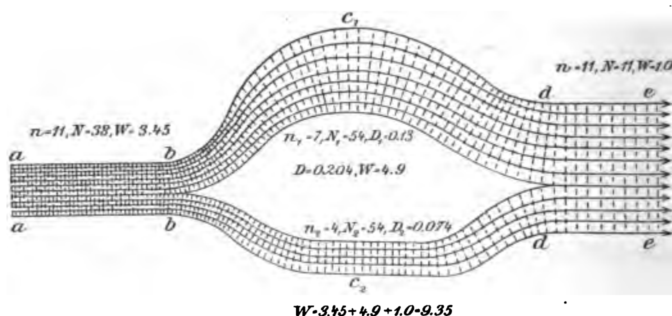


Fig. 22. Verzweigung einer Strömung.

diese Strombahnen von Anfang an vorgeschrieben sind, wie dies bei der Strömung durch ein beliebiges Netz gekrümmter Leitungsröhren und Kanäle der Fall ist.

Die in dem Leitungsrohre $a\,b$ heranfliessende, in dem Rohre $d\,e$ abfliessende Strömung verteile sich zwischen b und d auf die neben einander geschalteten Zweigrohre

$b c_1 d$ und $b c_2 d$ (Fig. 22). Das Rohr $b c_1 d$ habe die Leitfähigkeit oder Durchlässigkeit D_1, das Rohr $b c_2 d$ habe die Durchlässigkeit D_2. Die Anzahl n_1 der Stromfäden, welche durch das erste Rohr fliessen, verhält sich zu der Strommenge n_2 in dem zweiten Rohre nach § 53 wie $D_1 : D_2$. Man kennt hiermit auch die Stärken f_1 und f_2 und die Geschwindigkeiten v_1 und v_2 der Strömung in beiden Zweigen (aus Gleichung [2]). Diese Geschwindigkeiten v_1 und v_2 hängen von dem Querschnitt und dem Dichten δ_1 bezw. δ_2, welche die Flüssigkeit in beiden (allenfalls verschieden temperierten) Rohren hat, ab. Das Verhältnis $v_2 : v_1$ bestimmt sich jedoch ausschliesslich durch die Längen l_1 und l_2 der beiden Zweigröhren

$$v_2 : v_1 = l_1 : l_2 .$$

Die Spannung N der Endquerschnitte bei b und d beider nebeneinander geschalteten Stromröhren hat nämlich denselben Wert (§ 53). Diese Spannung ist nach § 38 für das eine Rohr $N = v_1 l_1$ und für das zweite Rohr $N = v_2 l_2$, woraus folgt: $v_1 l_1 = v_2 l_2$.

§ 57. Die Leitfähigkeit beider nebeneinander geschalteter Rohre ist nach § 53 gleich $(D_1 + D_2)$; der Widerstand dieses verzweigten Teiles des Rohrnetzes ist also gleich $\frac{1}{D_1 + D_2}$. Addiert man hierzu die leicht (nach Gleichung [5]) zu berechnenden Widerstände der unverzweigten Rohrstücke $a b$ und $d e$, so erhält man nach § 52 den Widerstand der ganzen in Fig. 22 dargestellten Strombahn. Ist die ganze in dieselbe eintretende Strommenge n

gegeben, so können wir nun nach § 49 die Zahl N aller Niveauschichten, in welche Fig. 22 zerfällt, angeben. Diese Zahl verteilt sich nach § 52 auf die drei Strombahnen *ab*, *bd* und *de* im Verhältnis der bereits berechneten Widerstände dieser drei Bahnen. Somit kennen wir auch die Verteilung der Niveauschichten der Strömung und können die Spannung zwischen zwei beliebigen Querschnitten des Leitungsnetzes angeben.

15. Die Wirbelstärke oder motorische Kraft.

§ 58. Die Stromfäden eines Wirbelringes sind selbst ringförmig geschlossen und so auf demselben aufgereiht, wie Schlüssel an einem Schlüsselringe. Diesen „kettenringartigen" Zusammenhang der ringförmigen Stromfäden mit den ringförmigen Wirbelfäden ersieht man genauer aus dem Querschnitte durch einen Wirbelring. (Fig. 23.) Eine Niveaufläche desselben hat ungefähr die Form, welche eine über die Mittellinie des Wirbelringes gespannte Membran annehmen würde. Denkt man sich diese mehr und mehr ausgebaucht, doch so, dass sie stets von der Mittellinie des Wirbelringes an ihrem Rande festgehalten wird, so erhält man nacheinander die verschiedenen Formen aller Niveauflächen, welche in Fig. 23 durch gestrichelte Niveaulinien angedeutet sind, welche die ganze Strömung in N Niveauschichten zerlegen und sämtlich in der ringförmigen Mittellinie des Wirbels zusammenlaufen und zusammenhängen. (In Fig. 23 ist $N = 42$.)

Jedes aus den voll ausgezogenen Stromringen gebildete Bündel hat keinen Anfang und kein Ende, sondern

kehrt, wenn man es sich von einer beliebigen Niveaufläche ausgehend denkt, alle Niveauflächen durchbrechend und von demselben in N Niveauschichten geteilt, wieder zu der Ausgangsfläche zurück. J e d e r Stromfaden des

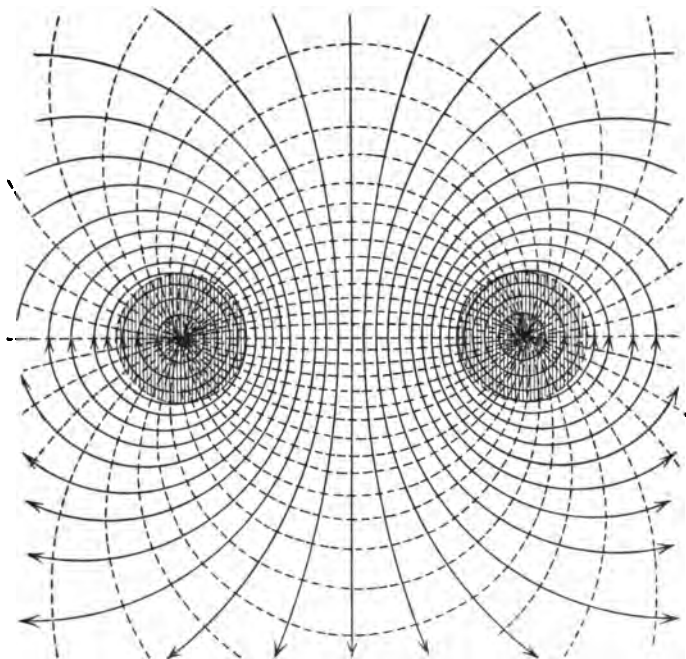


Fig. 23. Stromringe und Niveauflächen eines Wirbels (Querschnitt).

ganzen Wirbels bildet einen a u s N Z e l l e n bestehenden Ring.

Die Zahl N der Niveauschichten einer Wirbelströmung heisst die m o t o r i s c h e K r a f t des Wirbels und ist für denselben ebenso charakteristisch, wie dies die Strommenge (die Zahl n der Stromfäden) für eine Quelle ist.

Je grösser die motorische Kraft N, desto enger sind unter sonst gleichen Umständen die Niveauschichten und desto rascher ist die Wirbelströmung. Je grösser die Strommenge n einer Quelle, desto dünner sind cet. par. die Stromfäden und desto stärker ist die Quellströmung. Nach § 51 ist der Energiewert einer Wirbelströmung durch das Quadrat der motorischen Kraft N des Wirbels und durch die Durchlässigkeit D des durchströmten Raumes bestimmt, während der Energiewert einer Quellströmung mit dem Quadrate der Strommenge n und dem Widerstande W des durchströmten Raumes wächst.

§ 59. Ist die Strömung noch nicht in Niveauschichten zerlegt, so kann man die motorische Kraft eines Wirbels doch nach § 38 berechnen. Die motorische Kraft N eines Wirbelringes ist gleich der Länge einer beliebigen ringförmigen Stromlinie desselben multipliziert mit der mittleren Geschwindigkeit, welche in diesem Stromringe herrscht. Dies mag folgendes Beispiel erläutern. Die Stromlinien der ebenen Wirbelströmung Fig. 5 sind Kreise, die Niveauflächen sind radiale Ebenen, welche alle durch die Achse o_1 des Wirbels gehen. Die Geschwindigkeit der Wirbelströmung ist in der Nähe des Wirbels gross und wird nach aussen hin desto kleiner, je weiteren Umfang die kreisförmigen Stromlinien haben. Es gilt für jeden Stromkreis

$$N = 2\pi r \cdot v.$$

Hierin ist N die motorische Kraft des Wirbels, r der Radius, also $2\pi r$ die Länge irgend eines Stromkreises.

v die in demselben herrschende Geschwindigkeit der Strömung. Da N eine konstante Zahl ist, so hat das Produkt $r \cdot v$ für alle Stromkreise denselben Wert d. h. die Geschwindigkeit v ist desto kleiner, je grösser der Radius r des Stromringes ist.

§ 60. Man kann aber auch aus den Spannungen nicht ringförmiger, sondern gestreckter Strombündel, welchen einen Wirbelring einschliessen, die motorische Kraft desselben erkennen.

Wenn in einem Flusse ein Wirbelring auftritt, so setzt sich die durch ihn erregte Strömung mit der Flussströmung zusammen. Die resultierende Strömung zerfällt in drei deutlich von einander geschiedene Strombündel. Ausser dem Bündel von Stromringen, welches den Wirbelring unmittelbar umkreist, und von welchen jeder aus N Stromzellen besteht, sind noch die zwei gestreckten Strombündel vorhanden, in welche sich die Flussströmung teilt und von welchen das eine durch die Öffnung des Wirbelringes, das andere ringsum aussen neben dem Wirbelringe vorbeifliesst. Zwei Niveauflächen der Flussströmung und zwar die eine in grosser Entfernung stromauf-, die andere stromabwärts, betrachten wir als die Endflächen dieser zwei gestreckten Strombahnen, welche als nebeneinander geschaltete (siehe § 53) zu bezeichnen sind. Das Gesetz, dass zwei nebeneinander geschaltete (durch dieselben zwei Endniveauflächen begrenzte) Strombahnen dieselbe Spannung haben, verliert seine Gültigkeit, wenn dieselben durch einen Wirbelring getrennt sind. Das Zusammenlaufen vieler Niveauflächen in der Mittellinie des Wirbel-

ringes bewirkt, dass diese beiden Strombahnen nicht in gleich viele Niveauschichten zerfallen, nicht dieselbe Spannung haben. Die Spannung der einen Strombahn ist gerade um die motorische Kraft des Wirbels grösser als die Spannung der anderen Strombahn, weil (je nach ihren Richtungen) die Wirbelströmung und die Flussströmung in der einen Strombahn gleichgerichtet sind und sich verstärken, in der anderen Strombahn aber entgegengerichtet sind und sich schwächen.

In Fig. 4 erkennt man diese drei Strombahnen. Wäre kein Wirbel vorhanden, so hätten die zwei östlich und westlich die Figur begrenzenden Niveauflächen die Spannung 26. Jeder Stromfaden zerfiel in 26 Zellen, jede im Werte von 1 Erg und alle Stromfäden hätten nach § 50 gleichen Widerstand. Der Wirbel sammelt 42 Niveauschichten, welche in seine Mittellinie zusammenlaufen. Das nördliche Bündel der Flussströmung hat nun die Spannung 5, jeder Faden zerfällt in 5 Zellen, die Stromfäden sind kurz und doch sehr breit, sie haben also geringen Widerstand, die Stromzellen sind lang und sonach die Geschwindigkeit der nördlichen Strömung gering. Dort wirkt die Wirbelströmung der Flussströmung entgegen. Die südliche Strömung hat hingegen die Spannung 47, die langen und doch dünnen Stromfäden haben grossen Widerstand und zerfallen in 47 kurze Zellen, die Geschwindigkeit der Strömung ist gross, weil hier die Wirbel- und die Flussströmung gleich gerichtet sind. Die motorische Kraft des Wirbels ist 42. Man kann dies entweder daran erkennen, dass jeder eiförmige Strom-

faden des Wirbelgebietes in 42 Zellen zerfällt, oder daran, dass jeder Stromfaden der südlichen Flussströmung 42 Zellen mehr als ein Stromfaden der nördlichen Flussströmung hat.

16. Quellen und Wirbel in ungleichartigen Raumgebieten.

§ 61. Inmitten eines kreisförmigen sonnigen Gebietes (Fig. 24) entspringe eine Quelle, welche 30 Stromfäden aussendet, deren Quellmenge also 30 ist. Diese Stromfäden treffen die Schattengrenze überall senkrecht

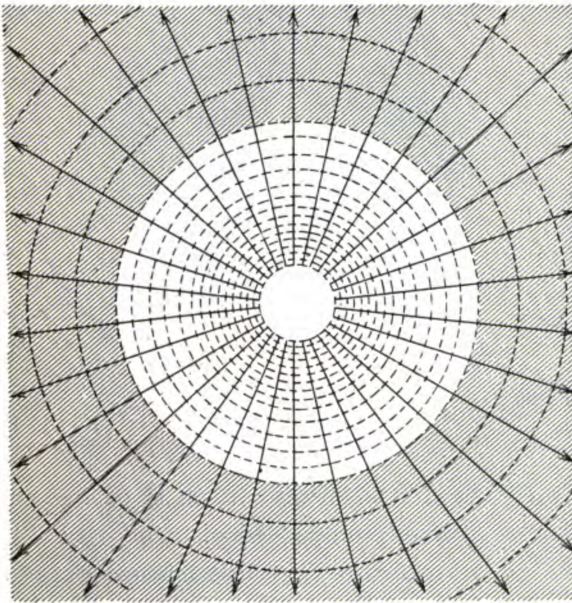


Fig. 24. Quellströmung im ungleichartigen Gebiete.

und treten (nach § 41) unverändert in das schattige Gebiet ein. Die Geschwindigkeit der Strömung wird aber in letzterem Gebiete entsprechend der grösseren Dichte des Wassers kleiner und also werden die kreisförmigen Niveauschichten dort weiter, ganz so wie in

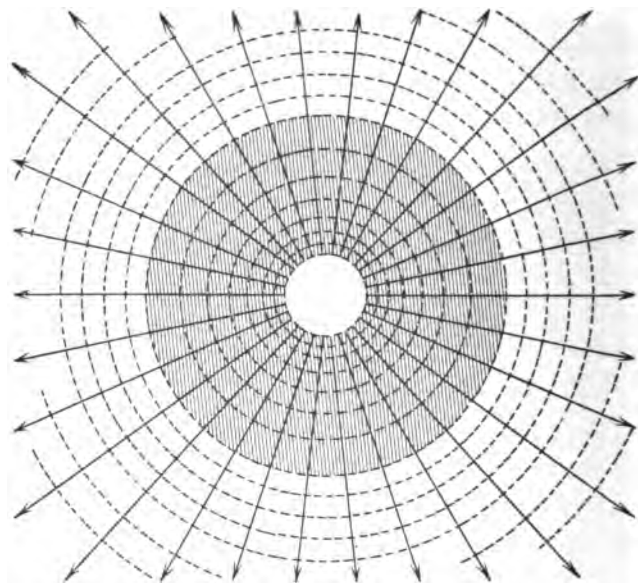


Fig. 25. Quellströmung im ungleichartigen Gebiete.

Fig. 14 (§ 41). Die Stromzellen haben in dem schattigen Gebiete eine mehr gestreckte Form.

In Fig. 25 entspringt die Quelle inmitten eines kreisförmig begrenzten schattigen Gebietes. Die Stromfäden dringen wieder unverändert in das sonnige Gebiet, wo jedoch die Niveauschichten enger sind, die Stromzellen eine mehr gedrungene Form haben, und die Geschwindig-

keit der Strömung entsprechend der kleineren Dichte des Wassers eine grössere ist.

§ 62. In Fig. 26 und 27 sind die konjugierten Wirbelströmungen dargestellt, welche erhalten werden, wenn man in Fig. 24 und 25 die Niveaulinien zu Strom-

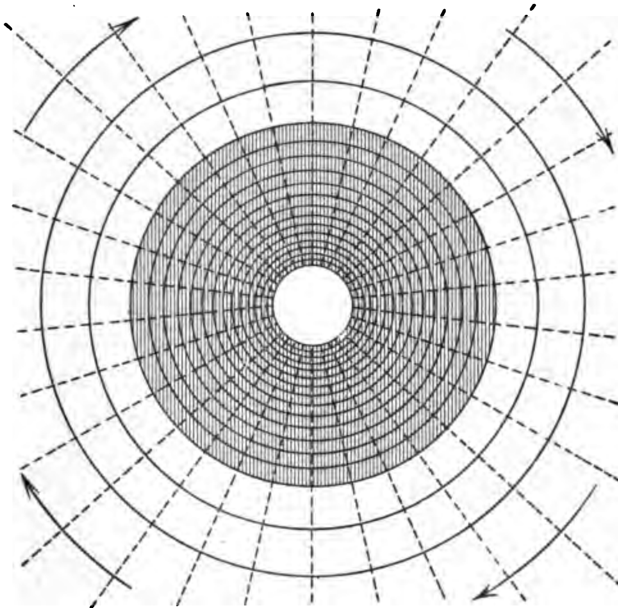


Fig. 26. Wirbel im ungleichartigen Gebiete.

linien macht und umgekehrt, und ferner Schatten und Sonne vertauscht (siehe § 43).

Diese Wirbelströmungen bestehen aus 30 Niveauschichten, jeder ringförmige Stromfaden besteht aus 30 Zellen, die motorische Kraft ist 30. Hier sind es die Niveauschichten, welche die Schattengrenze senkrecht

treffen und unverändert durch dieselbe treten, während die Stromfäden im Schatten enger, in der Sonne weiter sind. Die Wirbel haben eine bestimmte unveränderliche motorische Kraft. Die Strommenge eines Strombündels einer Wirbelströmung kann jedoch dadurch beliebig gross gemacht werden, dass man die spezifische Leit-

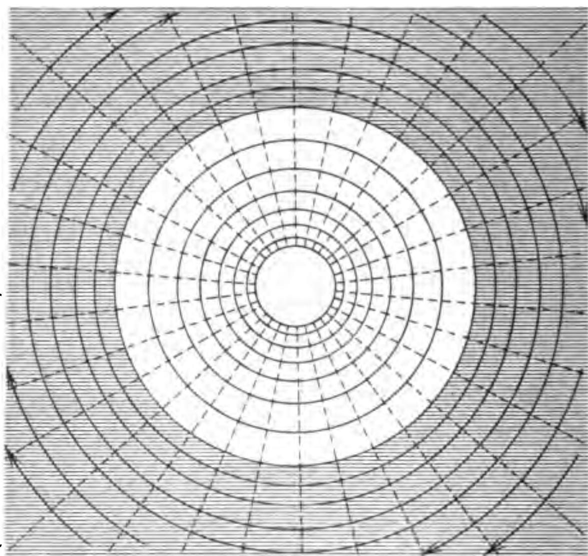


Fig. 27. Wirbel im ungleichartigen Gebiete.

fähigkeit der von diesem ringförmigen Strombündel durchlaufenen Bahn entsprechend vergrössert.

§ 63. Endlich betrachten wir die Quelle Fig. 28, welche gerade in der Schattengrenze gelegen ist. Die kreisförmigen Niveaulinien verlaufen hier senkrecht zu der Schattengrenze und treten unverändert durch die-

selbe. Die Geschwindigkeit der Strömung ist also auf beiden Seiten der Grenze, im Schatten wie in der Sonne, gleich gross. Deshalb ist die Stärke der Strömung in dem kühleren dichteren Wasser grösser und von den 30 Stromfäden der Quelle verlaufen nur 12 in dem

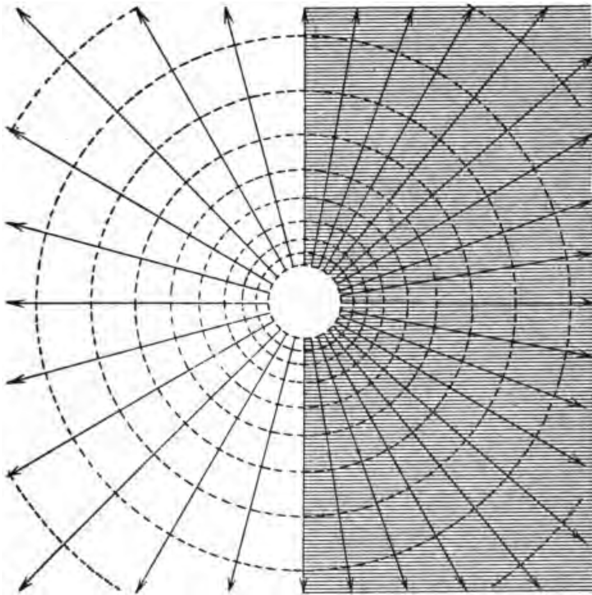


Fig. 28. Quelle in der Schattengrenze.

sonnigen Gebiete, während sich 18 in dem schattigen Gebiete zusammendrängen. Die Stromzellen sind im Schatten schmäler als in der Sonne. Fig. 29 stellt die konjugierte Wirbelströmung dar. 18 Niveauschichten verlaufen in dem sonnigen, 12 derselben in dem schattigen Gebiete. Die ringförmigen Stromfäden treten hingegen

unverändert durch die Schattengrenze. Die Stromzellen sind im sonnigen Gebiete kürzer als im Schatten, die Geschwindigkeit der Ringströmung ist also in dem sonnigen Gebiete grösser als im Schatten.

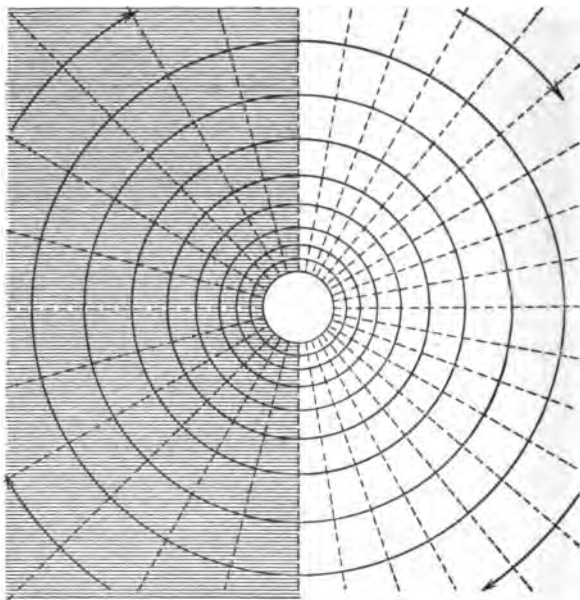


Fig. 29. Wirbel in der Schattengrenze.

17. Die Quirlströmung.

§ 64. Der Vergleich der stationären Wasserströmung mit den elektrischen und magnetischen Strömungen lässt sich auch auf die sehr interessante im Inneren der Wirbelringe vorhandene Strömungsform: die Quirlströmung ausdehnen. Der Begriff des Quirls einer Strömung ist für das Verständnis der modernen Elektrizitätslehre

unentbehrlich und ich bitte Sie daher den folgenden Ausführungen Ihre volle Aufmerksamkeit zuzuwenden.

In dem weitaus grössten Gebiete einer Strömung hat dieselbe den bisher beschriebenen Verlauf. Aber es giebt notwendig in jedem durchströmten Raume einige Gebiete, in welchen nicht alle im Obigen mitgeteilten Strömungsgesetze gelten und in welchen das Zellgewebe der Strömung eine abweichende Struktur hat. Es sind diese Ausnahmsgebiete: das Innere der Quellgebiete und das Innere der Wirbelringe, also gerade jene Gebiete, in welchen die Ursachen der Strömung ihren Sitz haben.

§ 65. Untersuchen wir nur das Innere der Wirbelringe. Schon in Fig. 6 wurden die Querschnitte eines Wirbelringes durch Schraffierung hervorgehoben, die Strömung innerhalb dieser Querschnitte aber nicht näher beschrieben.

Fig. 23 stellt die Strömung im Innern der schraffierten Querschnitte eines Wirbelringes genauer dar. Man erkennt, dass die Stromfäden an der Oberfläche des Wirbelringes am dünnsten sind. Dort ist die Strömung am stärksten. Nicht nur nach aussen, sondern auch nach innen wird die Strömung schwächer, denn in der Mittellinie eines ruhenden Wirbelringes[1]) kann überhaupt keine Strömung vorhanden sein. Nach aussen zu haben die Stromfäden immer grösseren Querschnitt, aber auch die Niveauschichten werden nach aussen zu breiter, so dass die Stromzellen in dem Aussenraum alle dieselbe Form,

---

[1]) Siehe § 82.

wenn auch verschiedene Grösse haben. Nach innen zu wird der Querschnitt der Stromfäden ebenfalls grösser, die Niveauschichten werden aber immer enger und laufen endlich in der Mittellinie des Wirbels zusammen. Die Stromzellen im Inneren des Wirbelgebietes haben also eine desto gedrungenere Form, je näher sie der Mittellinie liegen. Die Ursache dieser abnormalen Struktur des Zellgewebes liegt darin, dass das Wasser im Inneren der Wirbelgebiete nicht blos in Strömung, sondern ausserdem in Rotation begriffen ist.

§ 66. Fig. 30 stelle die Oberfläche eines Teiches dar, in welchem ein halber Wirbelring (vergl. § 21 Anmerkung) sich befindet. Die Querschnitte desselben treten in den schraffierten Flächen zu Tage. Ausserhalb dieser Flächen schwimme ein Kahn () auf dem Wasser, dessen Spitze z. B. nach Norden zeigt. Derselbe wird von der Strömung längs einer ringförmigen Stromlinie herumgetrieben, aber der Kahn dreht sich hierbei nicht, sondern seine Spitze zeigt immer nach Norden. Taucht man ein kleines Mühlrädchen, dessen Drehungsachse vertikal gehalten wird, ganz unter die Wasseroberfläche, jedoch ausserhalb des Wirbelringes, so befindet sich dasselbe zwar in einer lebhaften Wasserströmung, dreht sich aber nicht, sondern bleibt ruhig. Taucht man eine kleine Windfahne, deren Stiel vertikal steht, ganz unter die Wasseroberfläche, jedoch ausserhalb des Wirbelringes, so stellt sie sich nach einigen Schwingungen ruhig ein und zeigt die Richtung der Strömung an. Alle diese Beobachtungen lassen sich kurz zusammenfassen in dem

Satze: Das Wasser strömt zwar in ringförmigen Linien, aber es hat ausserhalb des Wirbelringes keine Drehung, keinen Quirl, die Wasserteilchen befinden sich nicht in Rotation.

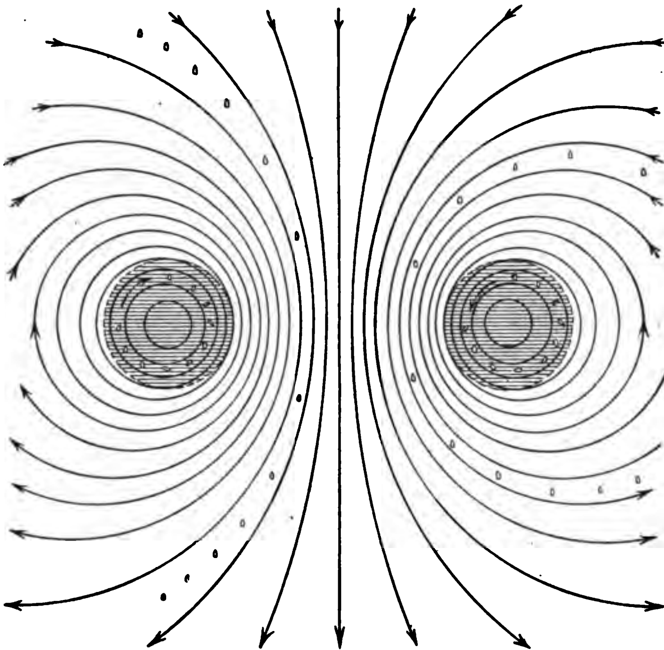


Fig. 30. Querschnitt durch einen Wirbelring.

§ 67. Anders wenn der Kahn in einem der schraffierten Gebiete, also im Inneren des Wirbels, schwimmt. Er wird hierbei ebenfalls längs einer ringförmigen Stromlinie herumgetrieben, seine Spitze zeigt aber dabei nicht fortdauernd in eine bestimmte Weltrichtung, sondern der Kahn dreht sich fortwährend. Taucht man ein kleines

Mühlrädchen, dessen Drehungsachse vertikal gehalten wird, innerhalb des Wirbelgebietes ganz unter die Wasseroberfläche, so dreht es sich fortwährend. Taucht man eine kleine Windfahne, deren Stiel vertikal gehalten wird, innerhalb des Wirbelgebietes ganz unter die Wasseroberfläche, so zeigt sie nicht die Richtung der Strömung an, sondern sie dreht sich fortwährend. Im Inneren des Wirbelringes hat also jedes Wasserteilchen (ob es nun strömt oder nicht) eine starke Rotation, einen Quirl, an jeder Stelle im Inneren des Wirbelringes quirlt die Strömung.

§ 68. Die Stärke des Quirls an irgend einer Stelle der Strömung ermisst man an der Rotationsgeschwindigkeit, welche das Wasser an dieser Stelle hat. Die Richtung der Quirlachse ist die Richtung der Achse dieser Rotation.

Die Stärke des Quirls wird also erkannt an der Rotationsgeschwindigkeit, welche ein kleines an der zu untersuchenden Stelle in die Strömung gehaltenes Windfähnchen annimmt. Jedoch muss man dem Stiele (der Drehungsachse) des Fähnchens jene Richtung geben, in welcher sich dasselbe am lebhaftesten dreht und zwar soll sich das Fähnchen, in der Richtung des Stieles betrachtet, im Sinne des Uhrzeigers drehen. Diese beste Richtung des Stieles zeigt die Richtung der Quirlachse an der untersuchten Stelle der Strömung an.

§ 69. Einen sehr dünnen, aber beliebig umfangreichen und beliebig geformten Wirbelring nennt man einen Wirbelfaden. Ein Wirbelfaden kann ebenso-

wenig wie ein dicker Wirbelring zwei freie Enden haben, sondern bildet immer einen geschlossenen Ring. Halten wir ein sehr kleines Windfähnchen in das Innere eines Wirbelfadens, so dreht es sich am besten, wenn sein Stiel in die Richtung (des Umfanges) des Wirbelfadens zeigt. Es liegt also die Quirlachse im Inneren eines Wirbelfadens überall in der Richtung des Wirbelfadens.

Die Stärke Q des Quirls ist im ganzen Umfange des Wirbelfadens überall gleich, wenn dieser Faden überall gleichmässig dick ist. Hat jedoch der Wirbelfaden an verschiedenen Stellen seines Umfanges verschiedenen Querschnitt ω, so zeigt sich, dass der Quirl dort entsprechend schwächer ist, wo der Wirbelfaden dick ist. In den dünnsten Stellen dieses Fadens dreht sich das in denselben gehaltene Windfähnchen am raschesten.

Das Produkt $Q \cdot \omega$ hat also in jeder Stelle des Wirbelfadens denselben Wert, welcher für den Wirbelfaden charakteristisch ist, und die Wirbelstärke des Fadens heisst.

Ein dicker Wirbelring besteht immer aus einem Bündel solcher dünner Wirbelfäden, von welchen jeder eine andere Wirbelstärke haben kann. Die Summe der Wirbelstärken aller dieser Wirbelfäden bezeichnet man als die Wirbelstärke des dicken Wirbelringes.

§ 70. Viel genauer als nach der in § 68 angegebenen experimentellen Methode kann man das Vorhandensein und die Stärke eines Quirls an der abnormalen Struktur des Zellgewebes im Inneren des Wirbelringes erkennen.

Fig. 31 stelle zwei Stromlinien und zwei Niveaulinien einer ebenen Strömung dar, welche zusammen ein kleines krummliniges Viereck vom Flächeninhalte ω begrenzen.

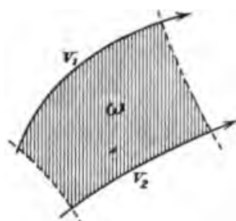


Fig. 31. Flächenstück vom Inhalte ω, welches von zwei Stromlinien und zwei Niveaulinien begrenzt wird.

Wenn die Längen der beiden Stromlinienstücke l_1 bezw. l_2 sind und die Strömung die Geschwindigkeit v_1 bezw. v_2 in diesen Stromlinienstücken hat, so ist nach § 35 in jeder quirlfreien Strömung

$$v_1 l_1 = v_2 l_2$$

und misst dieses Produkt die Spannung der beiden Niveauflächen (vergl. § 38).

Quirlt jedoch die Strömung an dieser Stelle, so ist $v_1 l_1$ nicht gleich $v_2 l_2$, zwei Niveauflächen haben in einem Quirlgebiete keine bestimmte Spannung. Der Unterschied

$$v_1 l_1 - v_2 l_2 = Q\omega \tag{6}$$

ist ein genaues Mass der Wirbelstärke $Q\omega$ jenes Wirbelfadens, dessen Querschnitt die in Fig. 31 dargestellte Fläche ω ist, welcher also von diesem krummlinigen Viereck umspannt wird und welcher senkrecht durch diese Fläche tritt.

Durch Gleichung (6) ergiebt sich auch ein genaues Mass der Stärke Q des Quirls, welcher innerhalb der Fläche ω vorhanden ist und deren Quirlachse zu dieser Fläche senkrecht steht.

§ 71. Die gesamte Wirbelstärke eines Wirbel-

ringes ist gleich der motorischen Kraft N (§ 58) desselben. Jede einzelne Niveauschicht des Wirbelringes bildet nämlich einen Wirbelfaden von dreieckigen Querschnitt, und es ist nach Gleichung (6) leicht einzusehen, dass jeder dieser Wirbelfäden die Wirbelstärke 1 besitzt[1]), dass also wie es obiger Satz fordert, die gesamte Wirbelstärke des Wirbelringes gleich der Anzahl N der Niveauschichten desselben ist.

18. Geradlinige Quirlströmungen.

§ 72. Als ein spezielles Beispiel zu obigen Ausführungen wollen wir noch die geradlinigen Quirlströmungen betrachten. Es wird uns dies für das Verständnis der elektrischen Strahlen von Nutzen sein, weil diese aus geradlinigen elektrischen und magnetischen Quirlströmungen bestehen.

Ob eine Strömung quirlt oder nicht quirlt kann man keineswegs aus der Form ihrer Stromlinien erkennen,

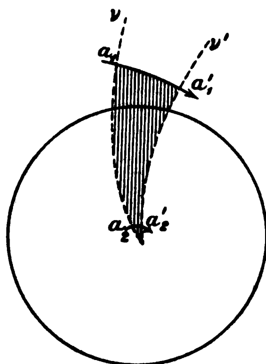


Fig. 32. Niveauschichte im Inneren eines Wirbelringes.

[1]) Die dreieckige schraffierte Fläche in Fig. 32 stellt eine Niveauschichte im Inneren eines Wirbelringes dar. Da das Stromlinienstück $a_1\, a_1'$ bereits ausserhalb des Wirbels liegt, so ist dort die Spannung der beiden Niveauflächen ν und ν': $v_1\, l_1 = 1$. Für das kurze Stromlinienstück $a_2\, a_2'$ in der Mitte des Wirbels gilt $v_2\, l_2 = 0$. Der von dem Viereck $a_1\, a_2\, a_2'\, a_1'$ umspannte Wirbelfaden, welcher eine Niveauschichte erfüllt, hat also nach Gleichung (6) die Wirbelstärke $v_1\, l_1 - v_2\, l_2 = 1$, was zu beweisen war.

sondern es muss auch noch die Geschwindigkeit der Strömung in den benachbarten Stromlinien (nach Gleichung [6]) in Betracht gezogen werden.

Keineswegs ist die Kreisform der Stromlinien in Fig. 30 die Ursache des Quirls, denn ein Windfähnchen mit vertikaler Drehungsachse, welches unter die Wasserfläche getaucht wird, dreht sich nur innerhalb der Querschnitte des Wirbelringes, während doch die Strömung ausserhalb derselben ebenfalls in kreisförmigen Linien fliesst. Andererseits kann nach Gleichung (6) auch eine völlig geradlinige Strömung quirlen, wenn sie in ihren parallelen geraden Stromlinien verschiedene Geschwindigkeit hat.

§ 73. Die folgende Fig. 33 stellt die geraden Stromfäden in der Nähe des Nordufers eines von West nach

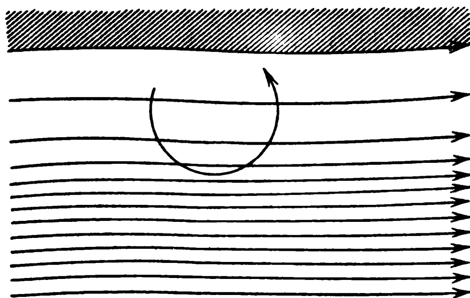


Fig. 33. Quirl an dem Flussufer.

Ost strömenden Flusses dar. In der Mitte des Flusses sind alle Stromfäden gleich breit, die Geschwindigkeit der Strömung in benachbarten Stromfäden ist dieselbe, dort quirlt die Strömung nicht. Je näher dem Ufer desto

langsamer fliesst aber die Strömung, ja in unmittelbarer Nähe des Ufers und des Flussgrundes ruht das Wasser völlig, des grossen Bewegungswiderstandes wegen, welchen es dort findet. Es ist nun leicht einzusehen, dass ein Mühlrädchen mit vertikaler Drehungsachse, welches man in der Nähe des Ufers unter die Wasseroberfläche taucht, sich fortwährend drehen muss, denn an der vom Ufer abgewendeten Seite des Rädchens fliesst der Strom rascher, es wird also diese Seite stärker angetrieben und das Rädchen muss sich fortwährend im Sinne des Pfeiles (Fig. 33), also umgekehrt wie ein Uhrzeiger, drehen. Auch ein Windfähnchen mit vertikaler Drehungsachse wird, wenn man es in der Nähe des Ufers unter Wasser taucht, nicht die Richtung der Strömung anzeigen, sondern sich fortwährend drehen, während dasselbe in der Mitte des Flusses, wo die Strömung nicht quirlt, sich in deren Richtung ruhig einstellen wird.

In der Nähe des anderen (Süd-) Ufers findet die entgegengesetzte Drehung statt, dort hat also die Quirlachse die entgegengesetzte Richtung. Die Wirbelfäden verlaufen nämlich vom Nordufer immer in der Nähe des Flussgrundes quer unter dem Flusse hindurch und kommen in der Nähe des Südufers wieder an die Oberfläche.

§ 74. Die Stromfäden von drei geradlinigen aber quirlenden Strömungen sind in Fig. 34 dargestellt und durch die Pfeile der Drehungssinn des Quirls angedeutet. Die Strömungen I und II zeigen Quirl, welche denselben Drehungssinn haben. Setzt man diese zwei Strömungen

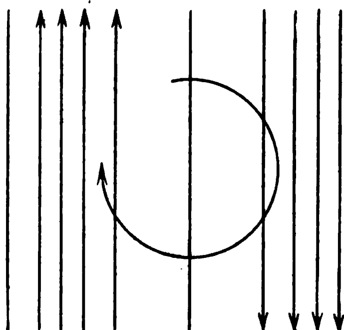


Fig. 34 I.

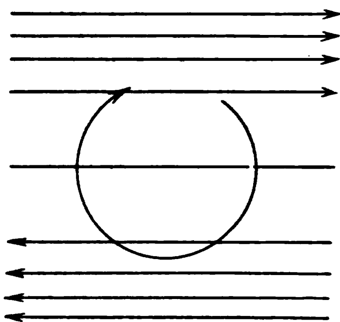


Fig. 34 II.

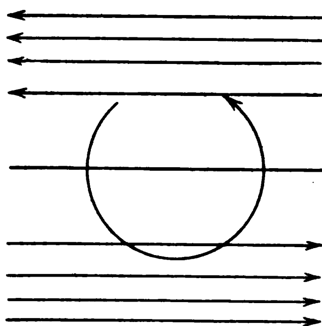


Fig. 34 III.

Fig. 34. Geradlinige, aber quirlende Strömungen.

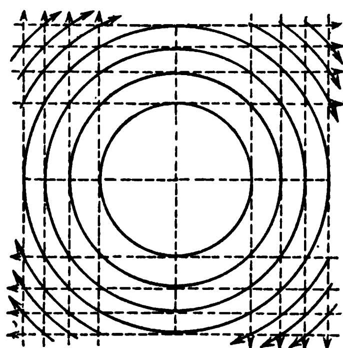


Fig. 35 A. Stark quirlende Strömung.

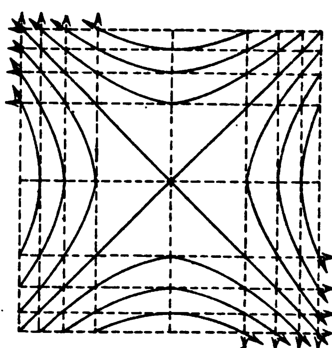


Fig. 35 B. Quirlfreie Strömung.

nach § 22 zusammen, so erhält man die Strömung Fig. 35 A. Diese Strömung quirlt doppelt so stark, wie jede der Strömungen I und II, weil sich die gleichgerichteten Quirl dieser Strömungen bei der Zusammensetzung derselben verstärken.

Setzt man jedoch die Strömungen I und III (Fig. 34) nach § 22 zusammen, so erhält man die quirlfreie Strömung Fig. 35 B. Da nämlich die Quirl der Strömungen I und III entgegengesetzte Richtung haben, so heben sie sich bei der Zusammensetzung dieser Strömungen auf, so dass die resultierende Strömung B keinen Quirl hat.

19. Die Kontraktilität der Stromfäden.

§ 75. Wir haben bisher nur völlig beständige oder stationäre Strömungen behandelt. Nun wollen wir Fälle in den Kreis unserer Betrachtung ziehen, in welchen eine Strömung eine verhältnismässig langsame Veränderung erfährt. Wir können hierbei immer noch von allen früheren Resultaten Gebrauch machen, denn während einer sehr langsamen Veränderung der Stromfäden hat die Strömung zu jeder Zeit nahezu genau den Verlauf einer stationären Strömung.

§ 76. Setzen wir zunächst voraus, dass sich bei diesen Veränderungen die Zahl n der Stromfäden nicht ändere, wie dies z. B. bei manchen Quellströmungen zutrifft. Da nun nach § 51

$$E = n^2 W,$$

so ändert sich in diesem Falle der Energiewert E der Strömung in demselben Verhältnis wie der Widerstand W des durchströmten Raumes.

§ 77. Setzen wir hingegen voraus, dass sich bei diesen Veränderungen die Zahl N der Niveauschichten der Strömung nicht ändere, was für Flüssigkeitsströmungen oft zutrifft. Da nach § 51

$$E = N^2 D,$$

so ändert sich in diesem Falle der Energiewert E der Strömung in demselben Verhältnis wie die Leitfähigkeit D des durchströmten Raumes, also in umgekehrtem Verhältnis wie der Widerstand desselben.

§ 78. Alle Veränderungen einer Strömung, welche mit einer Verkleinerung ihres Energiewertes verbunden sind, können nun entsprechende Arbeitsleistungen, mechanische Kraftäusserungen der Strömung bedingen.

Jene Strömungen, welche die Zahl n ihrer Stromfäden unverändert bewahren, können nach § 76 nur dadurch Arbeit leisten, dass der Widerstand des durchströmten Raumes abnimmt. Es könnte dies z. B. dadurch geschehen, dass die Strömung ein Rohr, durch welches sie fliesst, mit Gewalt erweitert; oder indem sie einen Körper, welcher für die Strömung ganz oder teilweise undurchlässig ist, bei Seite schiebt, d. h. ihn von einem Orte wo die Strömung stark ist zu einem Orte, wo die Strömung schwächer ist, transportiert; oder indem der Ursprungsort einer Quelle so verschoben wird,

dass sich die Entfernung derselben von einer Senke verkleinert u. s. w.

Die Widerstände aller einzelnen Stromfäden eines Strombündels sind nach § 50 stets einander gleich. Da nun die Strömung, während sie Arbeit leistet, die Zahl n ihrer Stromfäden nicht ändert und jedes Strombündel seine individuelle Existenz ungeachtet seiner Formänderung bewahrt, so muss sich die mit der Arbeitsleistung verbundene Verkleinerung des Widerstandes des Strombündels auf alle Stromfäden gleichmässig verteilen. Jeder Stromfaden muss demnach, während die Strömung Arbeit leistet, sich verkürzen oder dicker werden, denn nur hierdurch kann sein Widerstand sinken. Die Strombündel einer solchen Strömung zeigen also eine scheinbare Kontraktilität, als wären sie Muskeln. Während ein Strombündel sich verkürzt und dicker wird, kann es wie ein Muskel eine beträchtliche Kraft ausüben.

§ 79. Man kann es jedoch auch erzwingen, dass dieser selben Strömung, während sie unter Verkleinerung ihres Widerstandes Arbeit leistet, nicht die Zahl n ihrer Stromfäden, sondern die Zahl N ihrer Niveauschichten unverändert bewahrt bleibt. In diesem Falle steigt nach § 77 der Energiewert E der Strömung, während ihr Widerstand sinkt. Dennoch leistet diese Strömung auch unter diesen Umständen ganz in derselben Weise ihre mechanische Arbeit, als wenn sie sich selbst überlassen wäre und ihre Strombündel zeigen dieselbe scheinbare Kontraktilität. Diese Erhöhung des Energiewertes der Strömung und diese gleichzeitige Arbeitsleistung

derselben sind nicht umsonst zu erhalten, sondern müssen durch Aufwendung einer von aussen zugeführten Arbeit oder Energie hergestellt werden. Damit also die Strömung die Zahl *N* ihrer Niveauschichten (ihre Spannung) bewahrt, muss ihr gerade der doppelte Wert der von ihr zu leistenden Arbeit von aussen in Form von Arbeit oder einer anderen Energie zugewendet werden.

§ 80. Alle in § 78 und 79 mitgeteilten Beziehungen kehren sich um, wenn die Strömung von Natur so beschaffen ist, dass sie, wenn man sie sich selbst überlässt, während eventueller Arbeitsleistungen nicht die Zahl *n* ihrer Stromfäden, sondern die Zahl *N* ihrer Niveauschichten unverändert bewahrt. Die mechanischen Wirkungen einer solchen Strömung verkleinern nach § 77 stets die Leitfähigkeit des durchströmten Raumes, jede Niveauschichte zeigt hierbei eine Schrumpfung, sie verkleinert ihre Oberfläche und vergrössert ihre Schichtendicke. Für das Studium der eigentlichen Flüssigkeitsströmungen wäre gerade dieser Fall wichtig, für uns ist es jedoch ohne Nutzen näher auf denselben einzugehen. Wir stehen hier bereits an jener in § 1 angedeuteten Grenze, über welche hinaus der Vergleich der Flüssigkeitsströmungen mit den elektrischen und magnetischen Erscheinungen nicht geführt werden kann.

20. Schlussbemerkung.

§ 81. Wir waren übrigens schon in den obigen Ausführungen nicht selten gezwungen, die Grenze ein wenig

zu überschreiten, bis zu welcher sich die elektrischen und magnetischen Erscheinungen mit reellen Flüssigkeitsströmungen vergleichen lassen.

Streng genommen giebt es überhaupt keine echten stationären Flüssigkeitsquellen, d. h. es giebt keine Orte, wo die Flüssigkeit entsteht und von welchen sie fortfliesst, ohne in gleichem Masse zu ihnen hinzufliessen. Eine Flüssigkeit muss der Quelle immer in einem wenn auch noch so dünnen Rohre zugeleitet, von einer Senke in einem solchen Rohre abgeleitet werden. Diese dünnen Rohre stören allerdings die übrige Strömung wenig und wir konnten von ihnen abstrahieren. Wohl aber werden wir echte elektrische Quellen und Senken kennen lernen. Auch die Strömung von Gasen und Dämpfen, da diese einer ausgiebigen Verdichtung fähig sind, kann nahezu stationäre echte Quellen und Senken haben.

§ 82. Ferner sind auch die Wirbel, welche wir bisher betrachtet haben, eigentlich nur Abstraktionen und kommen in genau der beschriebenen Form bei Flüssigkeitsströmungen nicht vor. Es giebt nämlich streng genommen überhaupt keine stationären ihre Lage bewahrenden Wirbelringe einer Flüssigkeitsströmung. Die Ursache davon ist, dass der Quirl einer Flüssigkeitsströmung immer mit einer wahren Rotation der Flüssigkeitsteilchen verbunden ist, welche diese Teilchen stets beibehalten. Es muss deshalb ein Stromfaden entweder gänzlich innerhalb oder gänzlich ausserhalb des Quirlgebietes verlaufen, denn sonst müsste jedes in ihm herumfliessende Flüssigkeitsteilchen bald rotieren und bald nicht

6*

rotieren, was unmöglich ist. Bei einem stationären Wirbelring verlaufen aber notwendig einige Stromfäden teilweise innerhalb, teilweise ausserhalb des Quirlgebietes, wie man auch in Fig. 23 und 30 erkennt. Deshalb verändert ein Flüssigkeitswirbelring fortwährend seinen Ort und vergrössert hierbei seinen Umfang (siehe § 18). Wohl aber werden wir vollkommen unveränderliche magnetische und elektrische Wirbelringe kennen lernen.

ERSTE VORLESUNG.

Die magnetische Strömung.

§ 83. Das Licht ist eine elektromagnetische Erscheinung. Wir haben also in unserem Auge einen besonderen Sinn für gewisse (rasch wechselnde) elektromagnetische Vorgänge. Für unveränderliche elektrische und magnetische Strömungen fehlt uns jedoch die direkte Empfindung und so haben unsere Vorfahren durch alle Jahrtausende fortwährend in kräftigen dauernden elektrischen und magnetischen Strömungen gelebt, ohne mehr davon zu bemerken, als gelegentlich einen Blitz oder ein Nordlicht, welche Erscheinungen aber der Untersuchung unzugänglich waren und nur Staunen erwecken konnten.

Die Erforschung dieser Strömungen beginnt mit der Entdeckung der ersten greifbaren mechanischen Wirkungen derselben, ganz unscheinbarer aber bei einigem Nachdenken auffallender Bewegungen, welche Eisenstückchen in der Nähe mancher Stücke des Magneteisenerzes ausführen. Vor ungefähr 900 Jahren wurde, vermutlich in

Norwegen, entdeckt, dass sich die magnetische Wirkung dieses Erzes durch blosse Berührung auf Stahlstäbchen übertragen lasse und wir haben aus dieser Zeit die erste Nachricht über die Nordweisung der frei schwimmenden Magnete. Erst 200 Jahre später verwenden die Chinesen den Schiffskompass, welcher bald darauf auch in Europa schon eine hohe Vervollkommnung erreicht hatte.

§ 84. Alte indische und arabische Märchen weisen bereits auf die Bekanntschaft der magnetischen Kraftwirkungen hin und wir wollen dieselben erwähnen, weil schon an dieser Stelle der Widerstreit der beiden Theorien, welche man sich über die magnetischen Kräfte bilden kann (die Fernwirkungstheorie und die Nahewirkungstheorie), seinen anschaulichen Ausdruck findet.

Der Kaufherr Sindbad aus Bagdad kommt bei seiner dritten Weltreise in ein unbekanntes, weites, spiegelglattes Meer. Am Horizont droht eine seltsame Klippe: der Magnetberg. Es herrscht völlige Windstille und dennoch treibt das Schiff, von einer unsichtbaren Strömung getragen, rasch dahin. Das Unheimliche dieser Strömung ist dem erfahrenen Seefahrer sogleich klar. Diese Strömung erfasst keinen anderen Gegenstand als gerade sein Schiff, während eine kupferne Boje oder das Logscheit, über Bord geworfen, ruhig auf dem ruhigen Wasser schwimmen und bald weit hinter dem Schiffe zurückbleiben. Endlich strandet dieses an dem Magnetberge, denn dorthin fliesst diese rätselhafte Strömung.

Da nun aber das Wasser offenbar nirgends in Bewegung begriffen ist, so glaubt der Schiffer nicht, dass

der unwiderstehliche Antrieb, welchem sein Schiff folgte, von dem dasselbe umgebenden ruhigen Wasser bewirkt wurde, sondern er glaubt lieber, es sei der Magnetberg selbst gewesen, welcher ohne Vermittelung des Meerwassers, ohne Zuhilfenahme irgend welcher materiellen Verbindung das Schiff auf meilenweite Entfernung beherrscht und an sich gezogen habe. Diese Auffassung der magnetischen Anziehungskraft bildet die Grundlage der Fernwirkungstheorie, welche lange Zeit die Wissenschaft beherrschte und erst vor wenigen Jahren überholt und verlassen wurde.

Gegenwärtig weiss man, dass der ganze Raum in der Umgebung eines Magnets in einem eigentümlichen strömungsartigen Zustande sich befindet. Der Magnet verursacht diese ganze Strömung. Er ist jedoch nicht die unmittelbare Ursache der Kraftwirkungen, welche ein Eisenstück in diesem Raume erfährt, sondern die unmittelbare Ursache dieser Kraftwirkungen ist die magnetische Strömung in der unmittelbaren Umgebung dieses Eisenstückes (Nahewirkungstheorie). Wenn nur die magnetische Strömung in der unmittelbaren Umgebung des Eisenstückes dieselbe bleibt, so wird das Eisenstück dieselbe Kraftwirkung erfahren, mag die Strömung in dem übrigen Raume, welche immer sein und welche Ursachen immer haben.

1. Die magnetische Strömung in Luft.

§ 85. Das einfachste Mittel um zu erkennen, ob in der Luft eine Strömung vorhanden ist oder nicht, ist

eine Windfahne. Wir verwenden zwei kleine Windfahnen (Fig. 36) aus verschiedenem Material. Ein gewöhnlicher Luftstrom bewegt beide Fähnchen in gleicher Weise und sie zeigen die Richtung der Luftströmung an.

Nun nähern wir ihnen einen grossen Magnetstab, von welchem die magnetische Strömung der Luft ausgeht, welche wir untersuchen wollen. Die eine Windfahne (welche aus magnetischem Stahlblech besteht) wird bewegt und zeigt die Richtung der magnetischen Strömung an. Die andere Windfahne (aus Messingblech) bleibt jedoch in Ruhe.

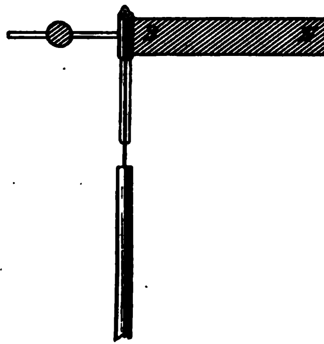


Fig. 36. Magnetisches Fähnchen.

Die magnetische Strömung, welche von dem Magnetstabe ausgesendet wird, ist also kein gewöhnlicher Wind, sondern die Luft bleibt ganz ruhig, wie man mittels einer Windfahne aus fast jedem beliebigen Material zeigen kann. Etwas Zigarrenrauch, welcher durch den schwächsten Wind fortgeweht würde, zeigt die magnetische Strömung der Luft nicht im Mindesten an, auch mit der Hand fühlt man nicht den leisesten Hauch in der Nähe des Magnets. Man hätte nie erfahren, dass die Luft durch den Magnetstab doch in einem strömungsartigen Zustand versetzt wird, wenn man nicht diese Fähnchen aus magnetischem Stahl hätte. Diese drehen sich in die

Richtung des magnetischen Stromes und lassen über sein Vorhandensein keinen Zweifel.

§ 86. Auch die Lebhaftigkeit, Kräftigkeit oder kurz Kraft der magnetischen Strömung kann mit Hilfe eines magnetischen Fähnchen gemessen werden. Man bestimmt zu diesem Zwecke auf direkte mechanische Weise die Grösse der Drehkraft, mit welcher der magnetische Strom die Fahne in seine Richtung dreht. Diese Drehkräfte sind freilich gewöhnlich sehr klein, viel schwächer als die Drehkraft, welche nötig ist eine Taschenuhr aufzuziehen, ja oft schwächer als die Drehkraft, welche nötig ist einen Seidenfaden zu tordieren und ihre Messung erfordert also geschickte Versuchsanordnungen und zarte Messinstrumente. Für unsere Zwecke reicht es aus, die Kraft der magnetischen Strömung durch die Schwingungsdauer des magnetischen Fähnchens zu bestimmen. Wenn man eine gewöhnliche Windfahne ein wenig aus der Windrichtung dreht und sie dann freilässt, so kehrt sie nicht sogleich in die Windrichtung zurück, sondern sie schwingt mehrmals hin und her, sie pendelt um die Windrichtung. Jede dieser Schwingungen dauert um so kürzer, je stärker der Wind ist. Ebenso kann man aus der Schwingungsdauer der magnetischen Stahlfahne die Kraft des magnetischen Stromes erkennen, in welchem sich die Fahne befindet.

2. Magnetische Stromlinien, Stromfäden und Niveauflächen.

§ 87. Wir wollen nun untersuchen, in welcher Weise der magnetische Strom, welcher aus dem Magnetstabe

fliesst, sich durch die Luft ausbreitet, ob er in geraden oder krummen Linien fliesst und an welchen Orten er kräftiger, an welchen Orten er minder kräftig ist.

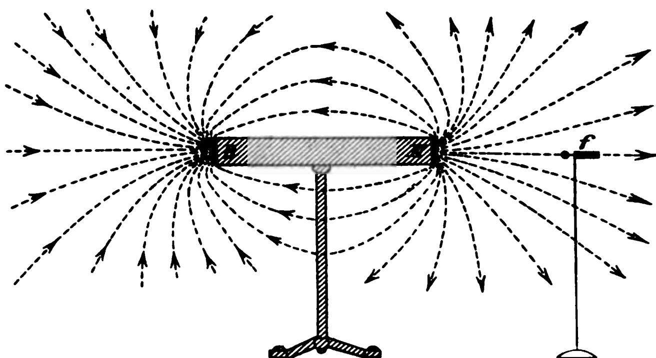


Fig. 37. Untersuchung der Strömung in der Umgebung eines Magnetstabes *NS* (von der Seite).

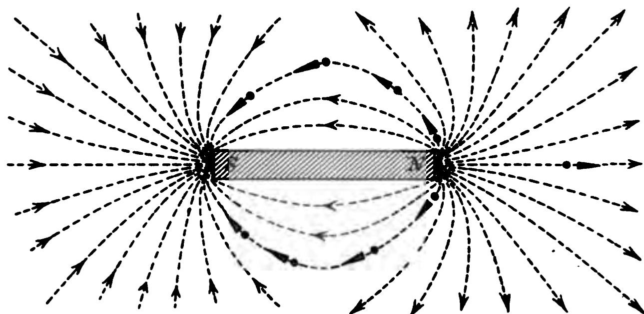


Fig. 38. Verlauf der Strömung in der Umgebung eines Magnetstabes *NS* (von oben gesehen).

Zu diesem Zwecke stellen wir den Magnetstab *NS* Fig. 37 und Fig. 38 in horizontaler Lage in die Höhe des Stahlfähnchens (Fig. 36) fest und führen nun das Fähnchen *f* in der Umgebung des Magnetstabes herum.

Man erkennt, dass die Strömung nicht von dem ganzen Magnetstabe ausgeht, sondern nur von dem einen Ende desselben, dem Nordpol *N* des Stabes, in dessen Nähe das Fähnchen direkt von dem Magnetstab nach aussen zeigt. Der magnetische Strom, welcher von dem Nordpol ausgeht, breitet sich nach allen Seiten aus, krümmt sich wie ein Federbusch nach rückwärts, fliesst dann neben dem Magnetstab diesem parallel und sammelt sich endlich an dem anderen Ende des Stabes, dem Südpol *S*, in welchen er hineinfliesst. Die krummen Linien und Pfeile in Fig. 37 und 38 geben den Verlauf und die Richtung der magnetischen Strömung an. Ein Magnetfähnchen sucht sich überall in diese Linien einzustellen und in die Richtung der Pfeile zu zeigen.

Nicht weit vor dem Nordpol zeigt das Fähnchen also schon nach seitwärts. Geht man stets der Richtung des Fähnchens nach, so bewegt man sich auf einer der dargestellten krummen Stromlinien. Bald zeigt das Fähnchen nach rückwärts und man geht neben dem Magnetstab diesem parallel gegen den Südpol hin. Dann zeigt das Fähnchen seitwärts und endlich völlig gegen den Südpol hin. Die Strömung hat somit ihren Anfang bei dem Nordpol und ihr Ende bei dem Südpol.

§ 88. Was die Stärke des magnetischen Stromes betrifft, so ist dieselbe überall dort am grössten, wo die Stromlinien eng gedrängt verlaufen, wo die Stromfäden eng sind. Wo hingegen die Stromfäden breit sind, ist die Strömung schwach. Das Fähnchen schwingt in der Nähe der beiden Pole des Magnetstabes *NS* rasch, dort

ist die Strömung zusammengedrängt und kräftig. In grösserer Entfernung von dem Magnetstabe breitet sich die Strömung mehr aus und wird schwächer, was man (nach § 86) daran erkennt, dass dort das Fähnchen langsam pendelt.

Der magnetische Strom verteilt sich seinem Verlauf und seiner Stärke nach genau nach denselben Gesetzen wie eine stationäre Wasserströmung in dem durchströmten Raume. Es ist dies mit aller Sicherheit konstatiert, denn man kann die Stärke des magnetischen Stromes und die Zahl der magnetischen Stromfäden noch viel genauer und einfacher experimentell untersuchen und messen (siehe w. u. § 217), als man die Stärke einer Wasserströmung bestimmen kann.

§ 89. Für jene Leser, welche die Einleitung zu diesen Vorlesungen studiert haben, werden noch folgende Bemerkungen von Interesse sein.

Eine Fläche, welche alle magnetischen Stromfäden senkrecht schneidet, welche von allen Stromlinien senkrecht durchflossen wird, nennt man eine magnetische Niveaufläche. Die gestrichelten Linien in Fig. 39 deuten eine Schar dieser Niveauflächen an. Durch dieselben werden die Stromfäden in kurze Stromzellen zerlegt und es gilt das Gesetz, dass die magnetische Strömung in den längeren Stromzellen minder kräftig in den kürzesten Stromzellen hingegen am kräftigsten ist.

In der Nähe der Pole sind also nicht nur die Stromfäden eng, sondern auch die Stromzellen kurz. In grösserer Entfernung von dem Magnet sind die Stromfäden sehr

breit und die Stromzellen sehr lang. Alle diese Stromfäden bestehen aus gleich viel Stromzellen. Die längeren

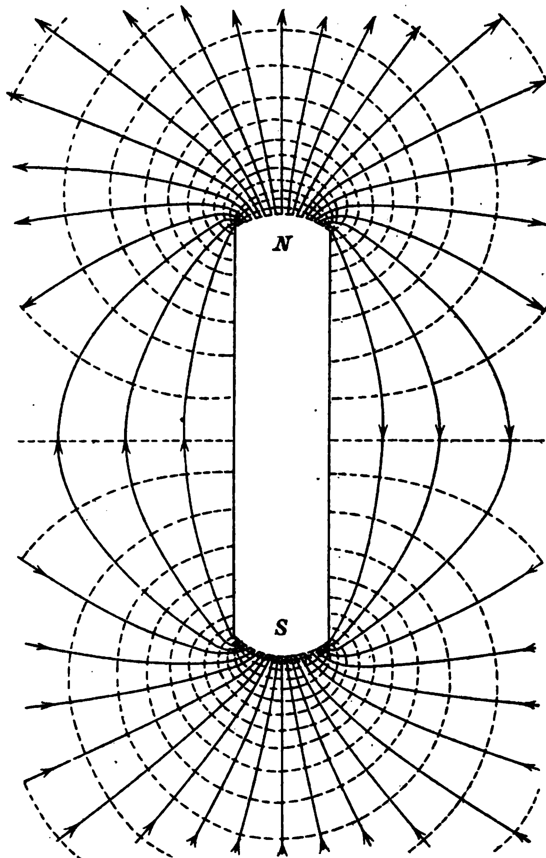


Fig. 39. Magnetische Niveauflächen und Stromzellen.

Stromfäden sind also auch breiter und alle Stromfäden haben denselben Widerstand.[1])

[1]) Vergl. § 50.

3. Die magnetische Strömung in festen und flüssigen Medien.

§ 90. Der magnetische Strom unterscheidet sich dadurch wesentlich von einer echten Flüssigkeits- oder Luftströmung, dass er mit Leichtigkeit alle Stoffe durchdringt, und auch von festen Wänden nicht aufgehalten wird.

Man kann ein Brett, eine Messingplatte zwischen den Magnetstab und die Stahlfahne halten, man kann ersteren ganz in einen Bleikasten schliessen, letztere unter einen Glassturz stellen und dennoch dringt die magnetische Strömung so leicht durch diese Wände wie durch Luft und lenkt das Fähnchen fast ganz in derselben Weise ab wie früher.

Damit schon haben wir einen ausreichenden Grund gefunden, warum die magnetische Strömung Windfahnen aus Messing, Aluminium, Holz etc. nicht abzulenken vermag. Sie dringt eben durch diese Stoffe ganz ebenso leicht wie durch Luft, diese Fähnchen setzen der Strömung keinen merklichen Widerstand entgegen und werden deshalb auch nicht von ihr gedreht. Würde auch die gewöhnliche Luftströmung ohne jeden Widerstand von diesen Fähnchen durchgelassen, so vermöchte sie dieselben gleichfalls nicht zu bewegen.

§ 91. Einige Stoffe, besonders W i s m u t h, sind allerdings für den magnetischen Strom etwas w e n i g e r durchlässig als Luft, und diese heissen d i a m a g n e t i s c h e Stoffe.

Es giebt aber merkwürdigerweise auch Stoffe (feste

und flüssige), welche eine weitaus grössere Durchlässigkeit für den magnetischen Strom haben als Luft, und diese Stoffe heissen paramagnetische Stoffe. Hierher gehört vor allem das Eisen, dann Eisenerze, ferner Nickel, Manganoxyd, viele Eisensalze, auch wässerige Lösungen derselben, in schwächerem Grade paramagnetisch sind noch viele andere Stoffe.

§ 92. Der magnetische Strom verläuft stets in jenen Bahnen, in welchen er den kleinsten Widerstand findet. Würde man eine Veränderung der Stromfäden vornehmen, sie z. B. an jenen Stellen wo sie eng sind erweitern, an jenen Stellen wo sie weit sind enger machen, oder ihre Krümmung ändern können, so würde der Widerstand, welchen der Strom nun findet, grösser sein als bei natürlichem Verlaufe desselben. Der magnetische Strom weicht aus gleichem Grunde den schlecht durchlässigen Stoffen aus und bevorzugt die besser durchlässigen Stoffe. Fig. 40 (S. 96) stellt die gleichmässige Strömung in einiger Entfernung vor dem Pole eines Magnetstabes dar. Fig. 41 (S. 97) stellt dieselbe Stelle dar, wenn eine eiserne Kugel dort der Strömung in den Weg gestellt ist. Die magnetische Strömung sammelt sich in dem Eisen, durch welches die Stromfäden eng gedrängt verlaufen, während sie neben demselben um so breiter, die Strömung in der Luft neben dem Eisen also um so schwächer wird.[1]) Legt man einen Eisenstab der Länge nach in eine gleichmässige magnetische Strömung, so sammeln sich in dem-

[1]) Vergl. § 46.

selben alle Stromfäden, welche vorher eine Luftsäule von 400 Mal grösserem Querschnitt erfüllten. Sie dringen sämtlich in das eine Ende des Stabes (Fig. 42, S. 98),

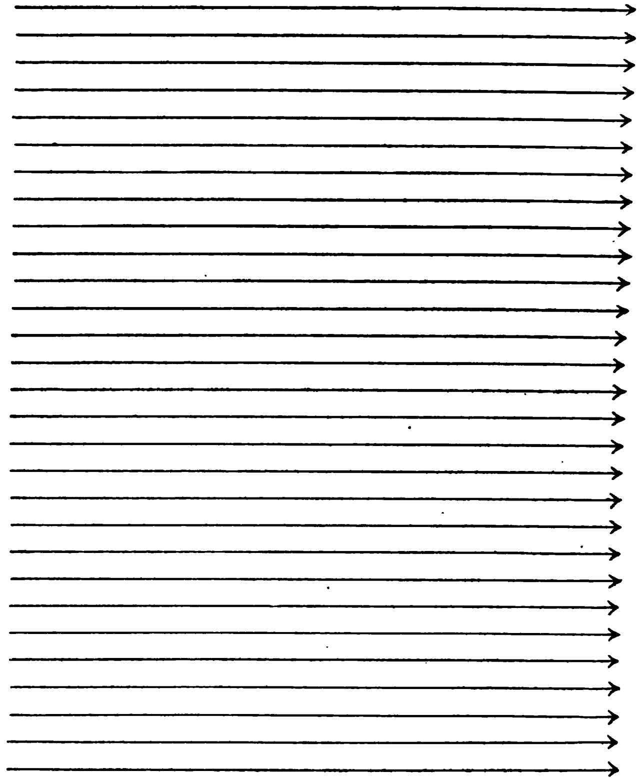


Fig. 40. Gleichmässiges magnetisches Feld.

welches sich also, allerdings n u r s o l a n g e der Stab sich im magnetischen Felde befindet, wie ein S ü d p o l verhält, verlaufen dann eng gedrängt der ganzen Länge nach durch den Eisenstab, und treten endlich in Form eines Büschels

aus dem anderen Ende des Eisenstabes aus, welches sich also, allerdings nur so lange der Stab sich im

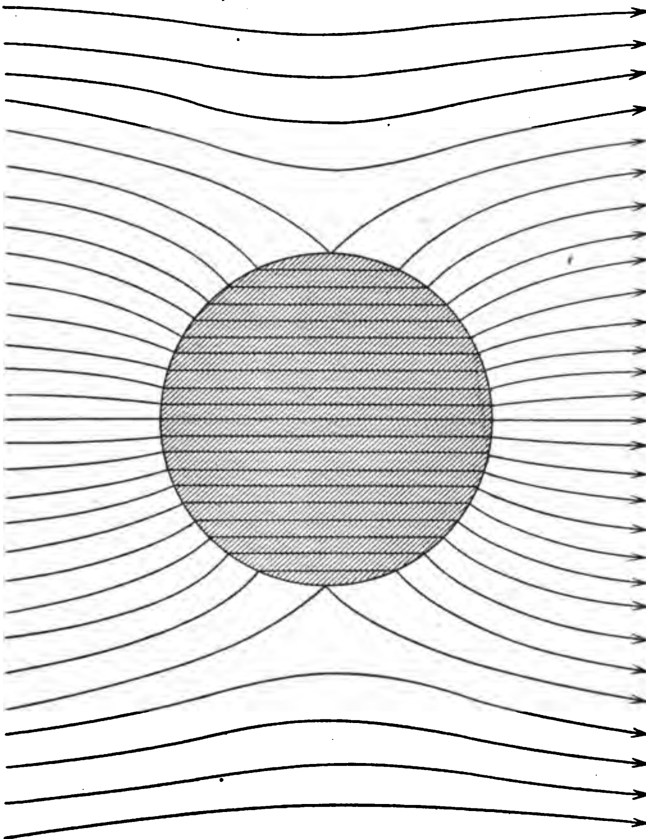


Fig. 41. Eisenkugel im gleichmässigen magnetischen Felde.

magnetischen Felde befindet, ganz wie der Nordpol eines Magnetes verhält. (Temporärer oder induzierter Magnetismus eines Eisenstabes.)

Man kann mittelst eines dicken Eisendrahtes die magnetische Strömung ziemlich weit von einem Magnetstabe nach einem beliebigen Orte fortleiten, so dass sie dort, aus dem freien Ende des Eisendrahtes austretend, ein magnetisches Fähnchen ablenkt.

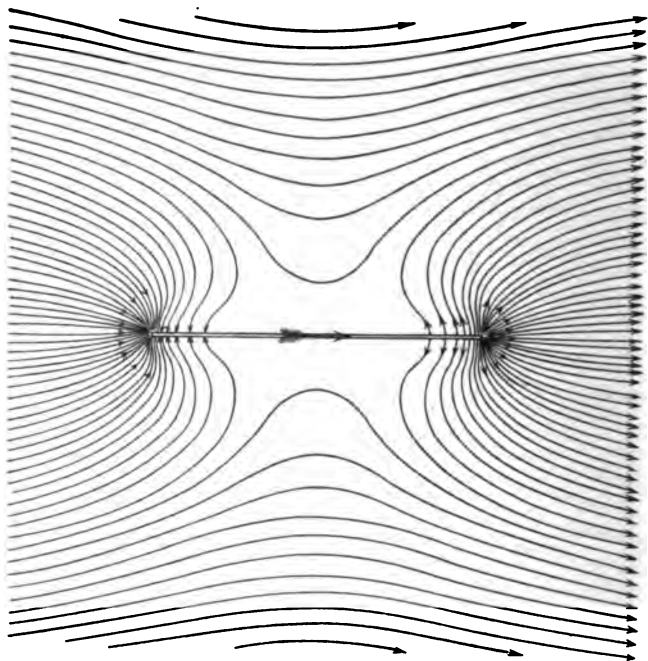


Fig. 42. Eisenstab im gleichmässigen magnetischen Felde.

Ferner bemerkt man in Fig. 41 und 42 die scharfe Brechung oder Knickung der magnetischen Stromfäden an der Oberfläche des Eisens. Man kann auch aus diesem Brechungswinkel die Durchlässigkeit des Eisens bestimmen, und erhält wieder die Zahl 400. Die Strom-

fäden verlaufen dieser hohen Durchlässigkeit des Eisens wegen fast senkrecht gegen die Oberfläche desselben.[1])

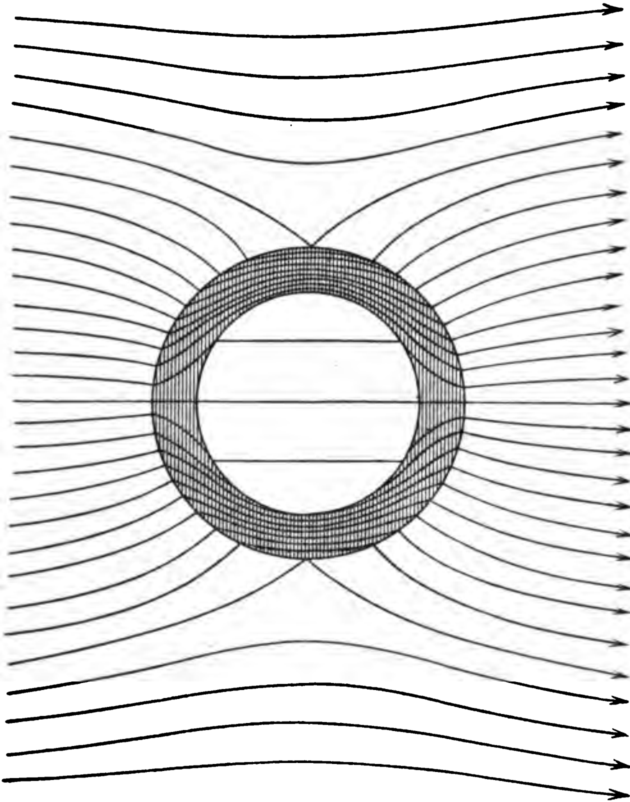


Fig. 43. Eiserner Hohlcylinder im magnetischen Felde.

§ 93. Wir haben in § 90 erfahren, dass ein Glassturz, welchen man über ein magnetisches Fähnchen stellt, nicht hindert, dass die magnetische Strömung hindurch-

[1]) Vergl. Fig. 21 § 47.

dringt und das Fähnchen ablenkt. Ein Eisentopf, welchen man über dasselbe stülpt, schützt es jedoch fast vollkommen vor jeder magnetischen Einwirkung, so dass es fast den Anschein hat, als wäre das Eisen für den magnetischen Strom undurchdringlich, während doch gerade das Gegenteil der Fall ist: der hohen Durchdringlichkeit des Eisens wegen verläuft nämlich der von aussen kommende magnetische Strom fast gänzlich in der Wand des Eisentopfes, ohne in das Innere desselben einzudringen, wie dies aus Fig. 43 ersichtlich ist. Hierauf beruht die Wirkung der eisernen Schutzmäntel, durch welche man elektrische Apparate und auch Taschenuhren vor dem Einflusse der starken magnetischen Ströme schützt, welche oft in der Nähe von Dynamomaschinen vorhanden sind.

§ 94. Die magnetische Strömung schiebt diamagnetische Stoffe, durch welche sie schlechter fliesst als durch Luft, von den Stellen, wo die Strömung stärker ist bei Seite nach Stellen wo die Strömung schwächer ist. Paramagnetische Stoffe, besonders Eisen, werden im Gegenteile nach den Stellen stärkster Strömung verschoben. Die Strömung sucht auf diese und überhaupt jede Weise den Widerstand ihrer Bahn zu verkleinern.[1])

Wenn man einem Stückchen Wismuthmetall, welches an einem feinen Faden hängt, einen kräftigen Magneten

[1]) Die idealen Flüssigkeitsströmungen, welche wir in der Einleitung behandelt haben, suchen im Gegenteile die Leitfähigkeit des durchströmten Raumes zu verkleinern. Vergl. § 80.



nähert, so wird dasselbe abgestossen, und zwar besonders stark von den beiden Polen des Magnets abgestossen. Auf die Richtung der magnetischen Strömung kommt es also hierbei nicht an, sondern nur auf die Verteilung der Stärke desselben. Das Wismutstückchen wird in der Nähe des Nordpoles in der Richtung der Strömung angetrieben, in der Nähe des Südpoles gegen die Stromrichtung bewegt, und an der Seite des Magnets quer gegen die Stromrichtung nach seitwärts gestossen. Immer wird es auf dem kürzesten Wege aus dem stärkeren Strome heraus an Stellen, wo der Strom schwächer ist, hingetrieben, jedoch mit sehr geringer Kraft.

Viel stärker ist die umgekehrte Wirkung, welche der Magnet auf Eisen oder Nickel hat, denn durch diese Stoffe fliesst die magnetische Strömung ganz beträchtlich leichter als durch Luft. Ein Eisenstückchen wird von beiden Polen des Magnets kräftig angezogen, auch zu den Seitenflächen des Magnets wird es hingezogen.

Wir tauchen einen Magnetstab in eine Schale, in welcher ein Gemisch von Eisenfeile und Sand sich befindet und ziehen ihn nun heraus. Der Magnetstab hat die Eisenfeile angezogen, welche nun in Büscheln an ihm hängt und den Sand in der Schale zurückgelassen. Bekanntlich benutzt man diese Wirkung im Grossbetriebe um arme Eisenerze anzureichern d. h. von eisenfreien Beimengungen zu befreien.

Tauchen wir den Magnet in eine Geldbörse, in

welcher sich ausser Kupfer-, Silber- und Goldstücken auch *Nickelmünzen* befinden, so werden nur letztere von dem Magnetstabe angezogen, hängen sich in Büscheln und Ketten an denselben und können mit ihm herausgezogen werden.

Die magnetische Strömung fliesst jedoch nur durch *kaltes* Nickel leichter als durch Luft. Durch glühendes Nickel fliesst sie etwas schwerer als durch Luft. Wir hängen eine Nickelmünze an einen dünnen Platindraht auf, erhitzen dieselbe mit einem Bunsenbrenner bis zur hellen Rotglut und entfernen dann die Flamme. Jetzt wird die glühende Münze von einem Magnetstabe ein wenig *abgestossen*, während sie aber abkühlt verliert sie diese Eigenschaft, bei dunkler Rotglut wird sie bereits ein wenig *angezogen* und je kälter sie wird, desto leichter geht die magnetische Strömung durch sie hindurch, und desto stärker wird sie von dem Magnetstabe angezogen.

§ 95. Man kann aus der Grösse der Kraft, mit welcher ein Körper von dem Magnete abgestossen oder angezogen wird, bestimmen, wie viel mal schwerer oder leichter die magnetische Strömung durch diesen Körper fliesst als durch Luft. Hierbei hat sich gezeigt, dass das *Eisen* für den magnetischen Strom merkwürdigerweise nicht weniger als 400 *mal durchlässiger* ist als die Luft, Magneteisenstein ist 100 mal, Nickel 20 mal, Manganoxyd 2 mal so durchlässig als Luft.

Diese Angaben bestätigen sich, wenn man, wie

wir dies in § 92 und § 93 gethan haben, den Verlauf der magnetischen Strömung durch Körper von verschiedener Durchlässigkeit studiert.

4. Die Kontraktilität der magnetischen Stromfäden.

§ 96. Die magnetische Strömung nimmt nicht nur jenen Verlauf, in welchem sie den kleinsten Widerstand findet, sondern sie sucht auch jene Körper, von welchen sie ausgeht und durch welche sie fliesst, so zu verschieben, dass der Widerstand des von ihr durchströmten Raumes möglichst klein wird, und sie vermag hierbei nicht unbeträchtliche mechanische Kraft zu äussern.

Fig. 44 stellt zwei in gleicher Richtung liegende Magnetstäbe $s_1 n_1$ und $s_2 n_2$ samt der in der Umgebung derselben verlaufenden magnetischen Strömung dar, welche sich ergiebt durch die Zusammensetzung[1]) der Strömungen, welche von jedem der beiden Magnete bewirkt würden, wenn derselbe allein vorhanden wäre. Die Strömung ist am kräftigsten in dem Strombündel $n_1 s_2$, welches zwischen den beiden Magnetstäben übergeht und die Form eines Muskels hat, dessen Enden an den beiden Magneten angeheftet sind, und welches thatsächlich wie ein Muskel wirkt. Jeder Stromfaden desselben sucht seinen Widerstand zu verkleinern, also kürzer und breiter zu werden und vermag während dieser Kontraktion die Magnete gegen einander zu ziehen.

---

[1]) Vergl. § 24.

§ 97. Die Zahl der Stromfäden bleibt bei dieser Kontraktion des Strombündels erhalten, aber das Bündel wird hierbei kürzer, die Zahl der Niveauschichten wird kleiner und der Energiewert[1]) der magnetischen Strö-

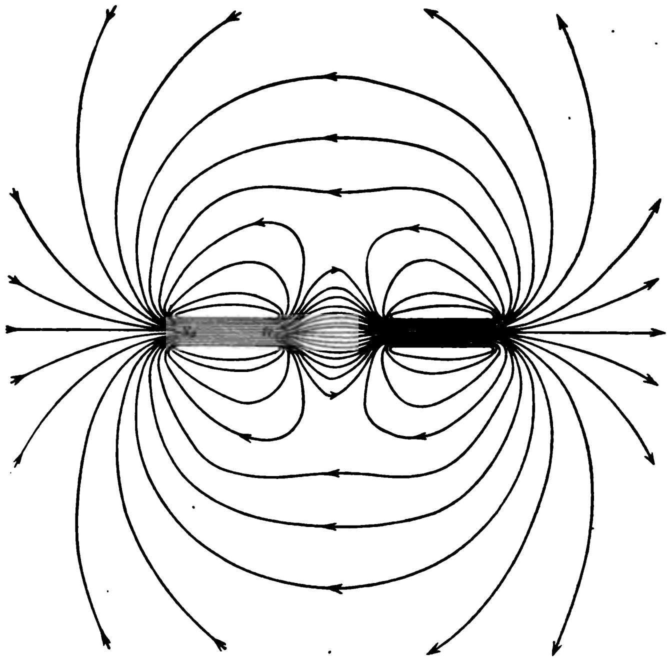


Fig. 44. Gleichgerichtete Magnete.

mung wird kleiner. Dafür aber leistet die Strömung hierbei eine Arbeit, deren Wert gleich ist dem verlorenen Energiewert desselben.

Sind die beiden Magnete so weit gegen einander gezogen worden, bis sich ihre Pole berühren, so ist damit

[1]) Vergl. § 51.

das zwischen ihnen übergehende Strombündel so verkürzt, dass es fast keinen Energiewert mehr hat. Zieht man nun die Magnete wieder mit Gewalt auseinander, so leistet man hierbei Arbeit, das Strombündel verlängert sich aber auch dabei wieder und nimmt einen immer

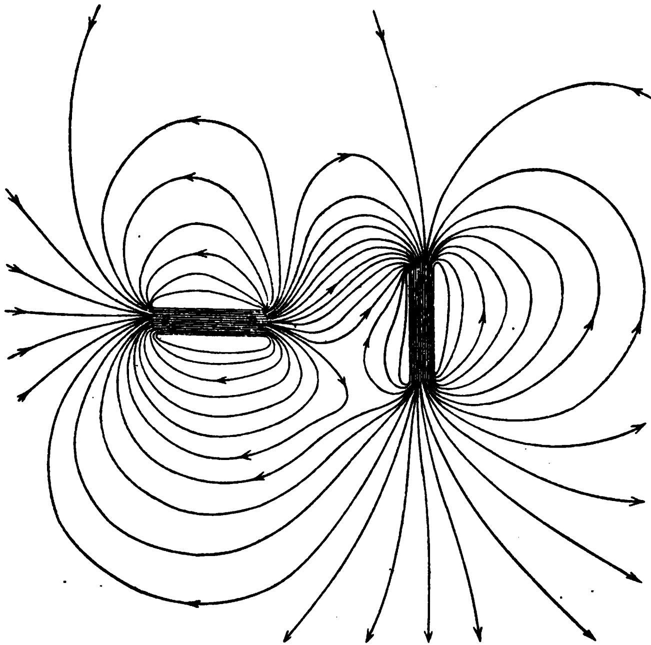


Fig. 45. Senkrecht zu einander gerichtete Magnete.

höheren Energiewert an, welcher dem Werte der aufgewendeten Arbeit entspricht und sich also leicht messen lässt.

§ 98. Wenn man den einen Magnet $s_2 n_2$ um 90^0 dreht, so krümmt sich das Strombündel **S** förmig (Fig. 45) und wird dabei beträchtlich länger. Lässt man den

Magnet $s_2 n_2$ nun wieder frei, so verkürzt sich das Strombündel und dreht den Magnet wieder in die Richtung des Magnets $n_1 s_1$.

§ 99. Man giebt den magnetischen Fähnchen gewöhnlich nicht die Form einer Windfahne (Fig. 36) sondern die Form symmetrischer um ihre Mitte drehbarer Stäbchen oder Nadeln (Fig. 46). Eine solche symmetrische Nadel könnte durch eine gewöhnliche Wind- oder Flüssig-

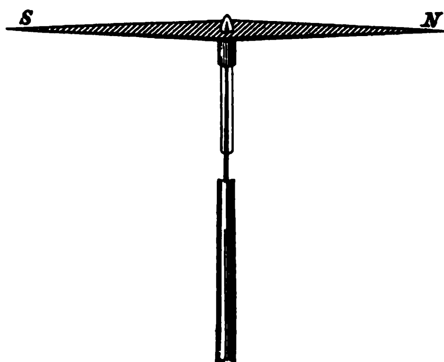


Fig. 46. **Magnetnadel.**

keitsströmung nicht gedreht werden, ein Windfähnchen muss immer einseitig auf seiner Stange sitzen. Die meisten magnetischen Experimente, wenn auch nicht alle, gelingen aber mit einer symmetrischen Nadel ebensogut wie mit dem magnetischen Fähnchen. Auch die symmetrischen Magnetnadeln werden von der magnetischen Strömung gedreht und zeigen die Richtung derselben an. Man erkennt hieraus, dass, dem ersten Anschein entgegen, diese Wirkung keine wesentliche Ähnlichkeit hat mit der Wirkung des Windes auf eine Windfahne. Der magnetische

Strom treibt das Magnetfähnchen nicht einfach vor sich her. Die Einstellung der Magnetnadeln und magnetischen Fähnchen in die Richtung jeder magnetischen Strömung, in welche sie gebracht werden, erklärt sich vielmehr nach § 98 durch die Kontraktilität der Strombündel, welche an den Polen der Magnetnadel enden. Diese Strombündel sind verlängert und **S** förmig gekrümmt, wenn die Magnetnadel quer gegen eine magnetische Strömung gerichtet ist und sie sind möglichst verkürzt, wenn die Nadel in die Richtung der magnetischen Strömung zeigt, so dass diese auf geradem Wege in den Südpol der Nadel fliesst.

5. Der Wirbel des magnetischen Stromes.

§ 100. Wir haben in § 87 den Verlauf der magnetischen Strömung in der Umgebung eines Magnetstabes kennen gelernt. Dieselbe nimmt ihren Ursprung an dem Nordpol, sämtliche Stromfäden krümmen sich federbuschartig nach rückwärts und enden am Südpol des Magnets. Da nun aber der magnetische Strom nach § 95 durch Stahl noch viel leichter fliesst als durch Luft, wäre es höchst unwahrscheinlich, dass der Nordpol wirklich der Anfang oder eine Quelle, der Südpol das Ende oder eine Senke der magnetischen Strömung ist. Dieselbe fliesst vielmehr am Südpol in den Magnetstab hinein, durchfliesst ihn der ganzen Länge nach und tritt am Nordpol wieder aus. (Fig. 47.) Die Stromfäden haben keinen Anfang und kein Ende, sondern sind sämtlich ringförmig geschlossen. Diese magnetische Strömung hat keine Quellen und Senken, sondern bildet einen Wirbel.

Man überzeugt sich hiervon, indem man einen Magnetstab in zwei Teile bricht, und diese ein wenig von einander entfernt. Man konstatiert dann in der Bruchstelle (bei *a*

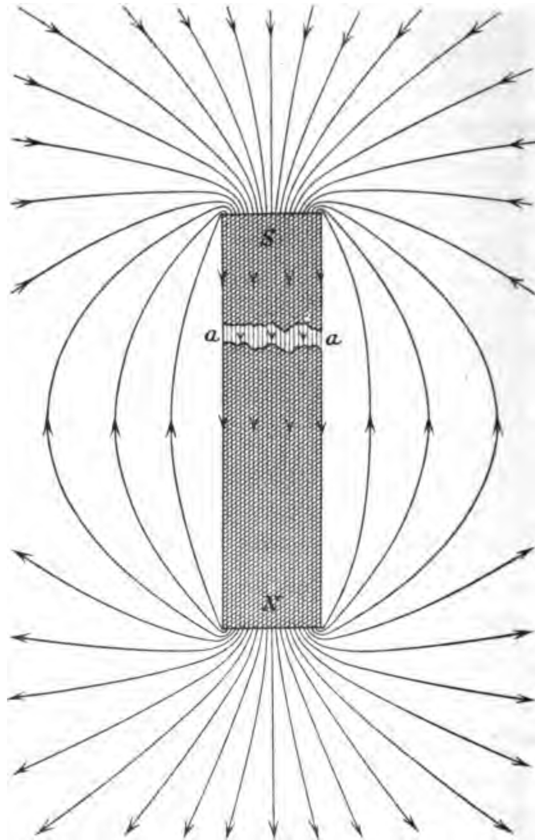


Fig. 47. **Magnetischer Wirbel.**

Fig. 47) den ganzen heftigen magnetischen Strom, welcher den Magnetstab der Länge nach durchfliesst. Hätte der Strom wirklich seinen Anfang im Nordpol, sein Ende am

Südpol, so würde in der Bruchstelle *a* keine magnetische Strömung auftreten.

Auch in allen komplizierteren magnetischen Feldern, wenn z. B. mehrere Magnete vorhanden sind (Fig. 44 und 45), ist jeder Stromfaden ringförmig geschlossen, niemals hat ein magnetischer Stromfaden zwei freie Enden, niemals hat die magnetische Strömung Quellen oder Senken, sondern sie bildet immer Wirbel.

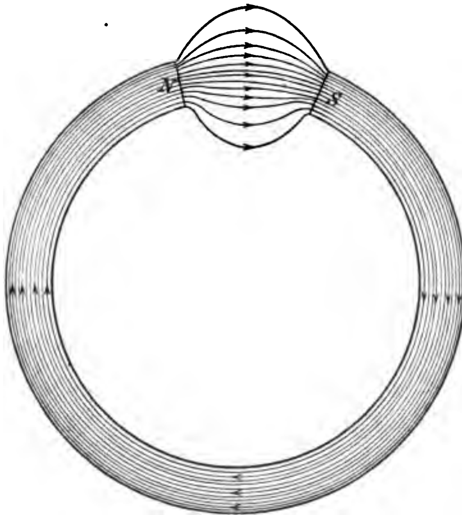


Fig. 48. **Hufeisenmagnet.**

§ 101. Um eine besonders kräftige magnetische Strömung zu erhalten, verwendet man die Hufeisenmagnete (Fig. 48). Die Pole derselben stehen einander nahe gegenüber, so dass der zwischen ihnen übergehende magnetische Strom sich nicht durch den ganzen Luftraum verteilt, sondern fast völlig in dem kleinen Felde zwischen

den Polen verläuft, und im Ganzen ein Bündel von einfacher Ringform bildet. Der Widerstand der ganzen Strombahn ist ausserdem ein geringer, da der grösste Teil derselben in Stahl und nur ein kurzes Stück derselben in Luft verläuft.

Noch kleiner wird dieser Widerstand, wenn man den Anker des Hufeisenmagnets auflegt. Es ist dies ein Eisenstück, welches den Raum zwischen den Polen ausfüllt. Nun verläuft der magnetische Strom durchaus in Stahl und Eisen und hat deshalb eine so grosse Stärke, dass eine oft sehr grosse Kraft nötig ist, um den Anker abzureissen.

6. Die Magnetisierung.

§ 102. Ein Eisenstab, welchen man in eine magnetische Strömung bringt, sammelt dieselbe zwar nach § 92 und wird der Länge nach von ihr durchflossen, aber er ist damit noch kein Magnet geworden, d. h. er hat nicht die Fähigkeit erlangt, einen magnetischen Wirbel zu erzeugen. Sobald man ihn aus der magnetischen Strömung bringt, erweist er sich als unmagnetisch.

Anders ein Stab aus hartem Stahl, am besten aus Wolframstahl. Bringt man diesen in eine magnetische Strömung, so sammelt er dieselbe im ersten Augenblicke, ebenso wie ein Eisenstab, bald aber erlangt er selbst die Fähigkeit einen magnetischen Wirbel zu erzeugen, er ist magnetisiert. Bringt man ihn nun aus der magnetischen Strömung heraus, so behält er diese Fähigkeit, einen magnetischen Wirbel zu erzeugen, dauernd bei, er ist

ein Magnet geworden. (Permanente Magnetisierung des Stahles.)

Erwärmt man einen Stahlmagnet, so schwächt sich der von ihm erzeugte magnetische Wirbel (seine magnetomotorische Kraft) ab, erlangt jedoch die ursprüngliche Stärke, wenn der Magnet wieder auf die anfängliche Temperatur abgekühlt wird.

§ 103. Die ersten Magnete wurden in natürlichen Lagern aufgefunden. Es sind dies Stücke von Magneteisenerz, welche wohl schon seit Jahrhunderten vor ihrer Auffindung magnetische Wirkung erhalten und seither bewahrt haben. Es ist nicht unwahrscheinlich, dass diese natürlichen Magnete ihre Wirksamkeit durch einen Blitzschlag erhielten, von welchem sie betroffen wurden. (Vergl. § 188.)

Von diesen natürlichen Magneten kann man die magnetische Wirkungsfähigkeit auf jedes Stahlstück übertragen. Sowie man einen Stahlstab einem Magnet nähert oder noch besser denselben mit dem Magnete berührt oder bestreicht, wird dieser Stahlstab ebenfalls dauernd ein Magnet.

Berührt man ein Ende eines Stahlstabes mit dem Nordpol eines Magnets, so strömt sogleich die Strömung dieses Magnets durch den Stahlstab. Diese Strömungsrichtung behält der dauernde magnetische Strom bei, welcher von nun an durch den neuen Magnet fliesst, auch wenn man den ersten Magnet entfernt hat. Das mit dem Nordpol berührte Ende bleibt also der Südpol des neuen Magnets, während gleichzeitig das andere Ende des Stahlstabes ein Nordpol geworden ist.

7. Der erdmagnetische Strom.

§ 104. Der ganze Luftocean, welcher den Erdball umgiebt, wird von einer wenn auch nicht sehr kräftigen, so doch einen ungeheuren Raum erfüllenden magnetischen Strömung durchflossen, denn der ganze Erdball verhält sich wie ein Magnet. Er sendet in den südlichen Polargegenden einen mächtigen magnetischen Strom aus, welcher wie ein enormer artesischer Brunnen dort aus der Erdoberfläche hervorbricht und nach allen Weltgegenden umbiegend längs der Erdoberfläche ungefähr in der Richtung der Meridiane nach Norden fliesst, sich in der Nähe des geographischen Nordpols wieder zu einem breiten Strahl sammelt und in die Erde versinkt.

Sehen Sie, wie unser magnetisches Fähnchen (Fig. 36) auch dann, wenn kein künstlicher Magnetstab in der Nähe ist, sich ganz anders verhält, als das messingene Windfähnchen. Dieses bleibt in jeder Richtung, in welche man es stellt, ruhig stehen. Das magnetische Fähnchen zeigt jedoch immer nach Norden (mit einer kleinen Abweichung nach Westen). Bringen wir es in eine andere Lage, so kehrt es sofort zurück und zeigt wieder nach Norden und ein gleiches thun alle Magnetnadeln hier im Hause, in der ganzen Stadt, in ganz Europa und überhaupt nahezu auf der ganzen Erde. Man kann sonach nicht zweifeln, dass ein ausgedehnter magnetischer Strom über die ganze Erdoberfläche von Süden nach Norden fliesst, weil derselbe alle Magnetnadeln und magnetischen Fähnchen auf der ganzen Erde nach Norden richtet.

§ 105. Das Kärtchen Fig. 49 stellt die Stromlinien des magnetischen Stromes für die Nordhälfte der Erde dar. Jede Magnetnadel auf der Erde stellt sich in diese Linien ein und zeigt in die Richtung der Pfeile (ungefähr gegen Norden). Geht man der Magnetnadel nach, so bewegt man sich in einer solchen Stromlinie und kommt an jenem Punkt im äussersten Norden von Nordamerika (auf der Halbinsel Boothia westlich vom Baffinland), wo

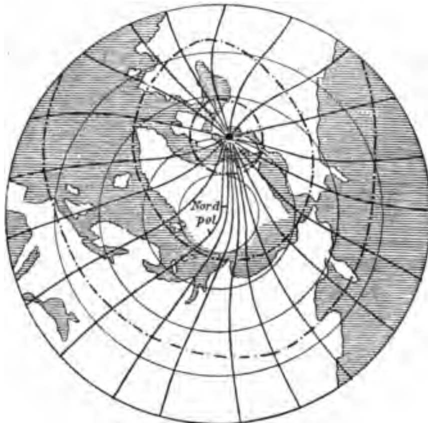


Fig. 49. **Erdmagnetische Stromlinien. Magnetischer Südpol der Erde.**

alle erdmagnetischen Stromlinien zusammenlaufen und welcher also der magnetische Südpol der Erde genannt werden muss, denn wenn man einem magnetischen Fähnchen in der Nähe eines grossen Magnetes nachgeht (§ 87), so kommt man zum Südpol desselben. Die erdmagnetischen Stromlinien ändern sich im Laufe der Jahre ein wenig, die ganze erdmagnetische Strömung ist nicht völlig unwandelbar, und so ändert sich auch die Lage der magnetischen Pole der Erde allmählich.

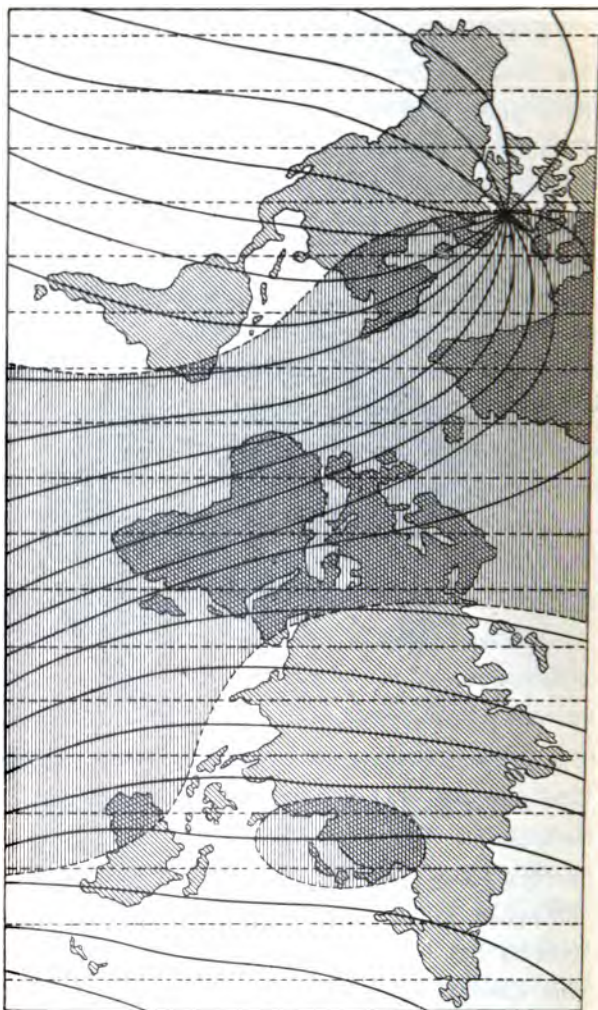


Fig. 50. Erdmagnetische Stromlinien und geographische Meridiane. In den horizontal schraffierten Gebieten (Europa, Afrika, China, Grönland) weicht die Magnetnadel nach Westen ab (westliche Deklination der Nadel), in den übrigen Erdgegenden ist die Deklination eine östliche.

Fig. 50 stellt den Verlauf der erdmagnetischen Stromlinien für die ganze Erdoberfläche in Mercators Projektion dar. Die Abweichung der Richtung dieser Linien von

den geographischen Meridianen (die Deklination) beträgt in Europa ungefähr 15⁰ nach Westen, in Mexiko ebensoviel nach Osten. In Grönland zeigt die Nadel ganz nach Westen, auf den Parryinseln sogar ganz nach Süden (gegen die Halbinsel Boothia hin).

§ 106. Man kann also aus der Richtung, welche eine Magnetnadel annimmt, bei Kenntnis der Deklination, die Himmelsrichtung erkennen. Sie wissen, welchen Aufschwung der Schiffahrt die Einführung dieses kleinen





Fig. 52. Boussole. Der Teilkreis steht fest.

Fig. 51. Schiffskompass in cardanischer Aufhängung. Der Teilkreis ist mit der Nadel verbunden und dreht sich an einem festen Zeiger vorbei.

Instrumentes im 15. Jahrhundert gebracht hat, welches man je nach seiner Ausstattung mit geteilten Kreisen Kompass (Fig. 51) oder Boussole (Fig. 52) nennt. So lange man die Himmelsrichtung nur an den Gestirnen erkennen konnte, verlor man auf offener See bei bedecktem Himmel alle Orientierung. Man durfte sich deshalb im Mittelalter nie weit von den Küsten wagen. Deshalb erfüllte auch die Entdeckung der Verkleinerung der Deklination im westlichen Ocean Christoph Columbus auf seiner ersten Entdeckungsreise mit

Schrecken, da er fürchten musste, im weiteren Verlaufe der Reise der Weisekraft der Nadel entbehren zu müssen.

Wir verdanken somit die Entdeckung zweier neuen Weltteile, einen der grössten Kulturfortschritte, dieser kleinen vom erdmagnetischen Strome gerichteten Nadel. Noch heute ist die transoceanische Schifffahrt vom Kompass abhängig.

§ 107. In den tropischen Gegenden fliesst der erdmagnetische Strom in der Richtung eines Südwindes längs der Erdoberfläche hin. Bei uns aber fliesst er schon stark in die Erdoberfläche hinein. Er kommt hier aus höheren Luftschichten und strömt schief wie ein Regen, welcher von einem Südwinde angetrieben wird nach abwärts in die Erde. Eine gut äquilibrierte in vertikaler der Westwand des Hauses paralleler Ebene drehbare Magnetnadel zeigt nach Norden aber steil nach abwärts, denn so schief (mit einer Inklination von 60⁰ von der Horizontalen abweichend) fliesst bei uns der erdmagnetische Strom. Auf der Halbinsel Boothia fliesst er senkrecht in die Erde. Am magnetischen Nordpol der Erde fliesst er senkrecht aus dem Eise. In Australien fliesst er unter 45 Graden schief nach aufwärts wie ein von einem Südwinde angetriebener Springbrunnen.

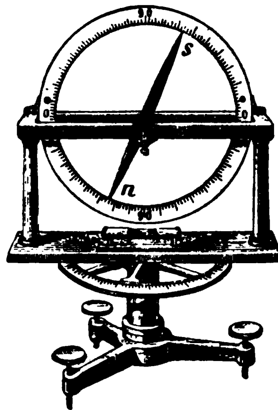


Fig. 53. Inklinationsnadel. Die Ebene des Teilkreises ist einer horizontalweisenden Magnetnadel parallel aufgestellt.

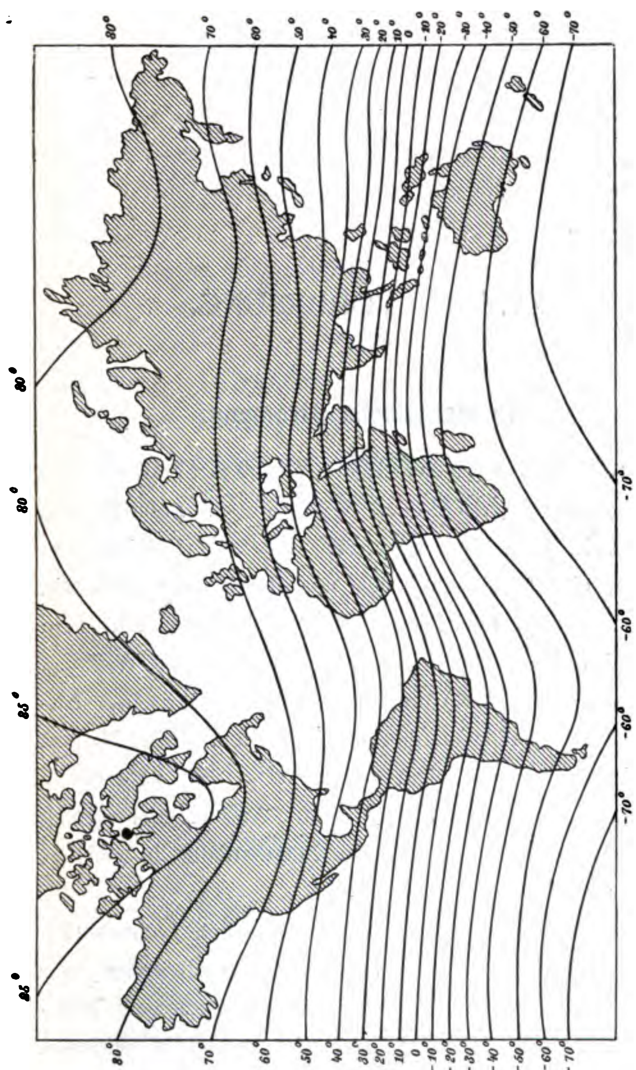


Fig. 54. Inklination des erdmagnetischen Stromes gegen die Horizontale. Orte gleicher Inklination der Nadel sind durch eine Linie verbunden.

ZWEITE VORLESUNG.

Die elektrische Strömung.

§ 108. Die ersten elektrischen Wirkungen beobachteten angeblich die altgriechischen Spinnerinnen. Spindeln aus Bernstein (griechisch Elektron) ziehen den Spinnfaden in einer eigentümlichen Weise an. Geriebener Bernstein zieht überhaupt alle leichten Körperchen an, und man hielt dies ursprünglich für eine magnetische Wirkung. Erst Gilbert (1600) unterschied die elektrischen Anziehungen scharf von den magnetischen. Ein Magnet zieht Hollundermark nicht an, während dies alle durch Reibung elektrisierten Körper thun. Andererseits vermag kein elektrisierter Körper eine Magnetnadel in gleicher Weise wie ein Magnet zu richten.

Dann beobachtete man die elektrischen Lichterscheinungen (Büschel, Funken). Das volle Interesse der Physiker wandte sich aber erst den elektrischen Wirkungen zu, als Watson (1728) zufällig an seinen seidenen Strümpfen die Beobachtung machte, dass zwei gleichartige

elektrische Körper sich abstossen. Bis dahin kannte man nur die magnetische Drehung der Magnetnadeln, die magnetischen und elektrischen Anziehungen, aber keine Abstossungen. Gleich darauf wurde entdeckt, dass sich die elektrische Wirksamkeit durch Metalldrähte fortleiten lasse, während Glas die elektrische Wirksamkeit nicht ableitet. Ein Körper, welcher auf einem Schemel mit Glasfüssen steht, ist elektrisch „isoliert“ und man kann denselben durch Berührung mit einem elektrischen Körper „laden“, d. h. ihm die Fähigkeit elektrischer Anziehung und Abstossung erteilen. Besonders gut lassen sich metallene Körper so durch Berührung mit einem elektrischen Körper elektrisieren, und sogar ein lebender Mensch, welcher auf dem Isolierschemel steht, kann durch Berührung mit einem elektrischen Körper geladen werden, und hat dann elektrische Wirkungen, und kann wieder entladen werden, wenn man ihn durch einen leitenden Metalldraht mit dem Fussboden verbindet.

Diese Experimente haben ihrerzeit das grösste Aufsehen gemacht und liessen schon erkennen, dass die elektrischen Erscheinungen viel mannigfaltiger und interessanter sind als die magnetischen. Ihr weiteres Studium führte zu ganz ungewöhnlichen Entdeckungen und Erfindungen.

1. Elektrische Quellen und Senken.

§ 109. In der Umgebung geriebener Körper befindet sich die Luft in einem eigentümlichen strömungsartigen Zustande, welcher kein Wind und von der magnetischen Strömung völlig verschieden, eine besondere Erscheinung ist.

Um die elektrische Strömung nachzuweisen, bedienen wir uns wieder eines Fähnchens wie Fig. 36, welches jedoch nicht aus magnetischem Stahl, sondern aus Hartgummi besteht, und vor den Versuchen ein wenig mit Pelzwerk gerieben und damit elektrisiert werden muss.

Nähern wir ein Stück geriebenen Bernsteins, einen geriebenen Hartgummistab, oder eine geriebene Siegellackstange dem elektrischen Fähnchen, so wird dasselbe durch den von diesen Körpern ausgehenden elektrischen Strom kräftig fortgeblasen. Ein Magnetstab übt diese Wirkung auf das elektrische Fähnchen nicht aus.

Die elektrische Strömung hat auch einen ganz anderen Verlauf als die magnetische Strömung. Wir erinnern uns, dass letztere nur aus dem Nordende der Magnete ausströmt, in das Südende derselben wieder einfliesst und immer in geschlossenen Ringen fliesst, also Wirbel bildet.

Hingegen treibt ein Hartgummistab das elektrische Fähnchen immer von sich, wir finden keine Stelle desselben, gegen welche das Fähnchen hin zeigt. Die elektrische Strömung fliesst aus allen Stellen des Hartgummistabes, welche gerieben wurden, aus und von dem Stabe weg. Es giebt keine Stelle des Stabes, gegen welche die elektrische Strömung hinfliessen würde. Der Hartgummistab bildet also eine echte Ursprungsstelle, eine Quelle der elektrischen Strömung.

Hingegen kennt man eine Quelle der magnetischen Strömung nicht. Der Nordpol eines Magnetstabes ist keine solche. Er sendet zwar die magnetische Strömung aus, aber der Südpol saugt dieselbe ein und führt sie

dem Nordpole wieder zu. Die magnetische Strömung ist also eine Ringströmung, nirgends entspringt dieselbe, dafür ist sie aber auch eine dauernde Erscheinung. Die elektrische Strömung hingegen geht fortwährend von dem Hartgummistabe weg, ohne irgendwo zu ihm zurückzufliessen. Dafür ist die elektrische Strömung auch eine hinfällige Erscheinung. Ein frisch geriebener Hartgummistab vermag nur kurze Zeit, höchstens einige Stunden, die elektrische Strömung auszusenden.

§ 110. Nun nähern wir einen mit (amalgamiertem) Leder geriebenen Glasstab unserem elektrischen Fähnchen. Dasselbe schlägt um und zeigt nun gegen den Glasstab hin. Dieser saugt also den elektrischen Strom ein. Welche Stelle des geriebenen Glasstabes wir auch gegen das Fähnchen wenden, jede zieht oder saugt dasselbe an sich, wenn auch stärker oder schwächer, je nachdem sie stärker oder schwächer gerieben wurde. Wir finden keine Stelle des Glasstabes, von welcher die elektrische Strömung ausgehen würde. Sie fliesst überall in den Stab hinein und kommt nirgends wieder heraus. Der geriebene Glasstab ist also eine Senke (Verschwindungsstelle, Endstelle) der elektrischen Strömung.

Auch Quarz, sowie die meisten Edelsteine und kieselhaltigen Minerale werden elektrische Senken, wenn man sie mit Leder reibt.

Die unedlen, leicht oxydierbaren Metalle werden elektrische Senken, die edlen, nicht oxydierbaren Metalle hingegen werden elektrische Quellen, wenn man sie mit Seide, Tuch oder Leder reibt.

Man nennt die elektrischen Quellen auch „negativ elektrisierte oder negativ geladene“ Körper, die elektrischen Senken werden als „positiv elektrisierte oder positiv geladene“ Körper bezeichnet.

§ 111. Die zwei Körper, welche man an einander reibt, werden hierdurch beide elektrisiert, und zwar wird ganz ausnahmslos der eine Körper eine elektrische Quelle, der andere Körper eine ebenso starke elektrische Senke. Wenn man die beiden Körper nach dem Reiben von einander entfernt, so sendet also der eine die elektrische Strömung aus, welche durch die Luft zu dem anderen Körper fliesst und in diesem endet.

Reiben wir z. B. einen Glasstab mit einem Kautschuklappen, so saugt der Stab das elektrische Fähnchen an, während das Reibzeug das Fähnchen ebenso stark von sich treibt. Reiben wir einen Hartgummistab mit Pelzwerk, so wird ersterer eine elektrische Quelle, letzteres eine ebenso starke elektrische Senke.

Bei den Reibungselektrisiermaschinen haben die beiden an einander geriebenen Körper eine etwas handlichere Form und stehen noch mit metallenen Kugeln in Kontakt. Diese Maschinen sind übrigens gegenwärtig ganz überholt und kaum mehr in Gebrauch.[1])

2. Die elektrische Strömung in festen und flüssigen Medien.

§ 112. Die elektrische Strömung dringt durch alle festen und flüssigen Körper leichter als durch Luft.

[1]) Der grosse Holzring an den Winter'schen Elektrisiermaschinen ist ein ganz zweckloses Anhängsel derselben.

Man kann z. B. eine Schwefelplatte oder eine Paraffinplatte zwischen den geriebenen Hartgummistab und das elektrische Fähnchen halten, man kann letzteres ganz in Öl untertauchen, ersteren in eine Blechbüchse stecken, und doch dringt die elektrische Strömung durch alle diese scheinbaren Hindernisse mit Leichtigkeit und lenkt das Fähnchen ab.

Die elektrische Strömung sucht nun ebenso wie wir dies bereits von der magnetischen Strömung wissen, auf jede Weise den Widerstand ihrer Bahn zu verkleinern und deshalb schiebt sie Stoffe, durch welche sie leichter fliesst, von Stellen, wo die Strömung schwächer ist, nach Stellen, wo sie stärker fliesst. Auf die Richtung der elektrischen Strömung kommt es dabei nicht an, sondern nur auf die Verteilung der Stärke derselben.

Nähert man einen geriebenen Hartgummistab oder auch einen geriebenen Glasstab einem Haufen feiner Hollundermarkschnitte, so geraten dieselben in Bewegung wie ein Mückenschwarm, flattern gegen den Stab hin und hängen sich an denselben. Es ist dies eine ganz ähnliche Erscheinung wie die Anziehung von Eisenfeile oder Nickelmünzen durch den Magnet, und auch die Ursache ist eine ähnliche. Die elektrischen Stäbe ziehen das Hollundermark an, weil der elektrische Strom in Hollundermark wie in allen festen Körpern leichter fliesst als in Luft. Das Hollundermark wird hierbei auf dem kürzesten Wege aus dem schwächeren elektrischen Strome in den stärkeren geschoben, gleichgültig, welche Richtung der-

selbe hat. Wenn es von dem Hartgummistabe angezogen wird, so bewegt es sich gegen die Richtung der von diesem ausgehenden elektrischen Strömung, wenn es von dem Glasstabe angezogen wird, so bewegt es sich in der Richtung der elektrischen Strömung, wogegen ein elektrisches Fähnchen sich stets in die Richtung der elektrischen Strömung einstellt.

Bringt man (durch Schütteln) viele kleine Luftblasen in Öl und taucht nun einen geriebenen Glas- oder Schellackstab in dasselbe, so werden die Luftblasen von den Stäben abgestossen, weil die elektrische Strömung durch Luft schwerer fliesst als durch Öl.

§ 113. Man kann aus der Kraft, mit welcher ein fester Stoff in Luft von einer elektrischen Quelle oder Senke angezogen wird, beurteilen, um wie viel durchlässiger dieser Stoff für die elektrische Strömung ist, als die Luft. Es zeigt sich, dass dieselbe durch Schwefel 2 mal, durch hartes Glas 4 mal, durch weiches Glas 8 mal so leicht fliesst als durch Luft.

Wir werden weiter unten viel bessere Methoden kennen lernen, um die Durchlässigkeit der verschiedenen Stoffe zu bestimmen, und uns überzeugen, dass z. B. Öl 2 mal, Alkohol 25 mal, Wasser 80 mal so durchlässig für die elektrische Strömung ist als Luft.

Ganz enorm gross ist jedoch die Durchlässigkeit aller Metalle für die elektrische Strömung. Dieselben sind mindestens 1 000 000 000 000 mal durchlässiger für dieselbe, als die Luft.

3. Verlauf der elektrischen Strömung.

§ 114. Wir wollen nun mit Hilfe eines kleinen elektrischen Fähnchens den Verlauf der elektrischen Strömung in verschiedenen Fällen untersuchen und hierbei auch die Kraft der elektrischen Strömung an verschiedenen Stellen des durchströmten Raumes bestimmen. Wir berücksichtigen also die Richtung, in welche sich das Fähnchen einstellt und die Kraft, mit welcher die Strömung das Fähnchen in diese Richtung dreht, welche letztere man auch an der Schwingungsdauer des Fähnchens erkennen kann. (Vergl. § 86.)

§ 115. Es wurde bereits mitgeteilt, dass niemals eine elektrische Quelle auftritt, ohne dass gleichzeitig an einem anderen Orte eine gleich starke Senke entsteht. Die elektrische Strömung entspringt der Quelle (— Fig. 55) und strömt in sanft geschwungenen (hier kreisförmigen) Stromlinien der Senke (+ Fig. 55) zu. In der Nähe der Quelle sowohl als der Senke, ist die Strömung eng zusammengedrängt und also stark. Die Stromfäden sind dort dünn. In grösserer Entfernung von den elektrisierten Körpern nehmen sie aber grössere Breite an und dort ist die Strömung schwach. Ihr Verlauf ähnelt in allen Fällen der Richtung und der Verteilung ihrer Stärke nach auf das genaueste dem Verlaufe einer stationären Wasserströmung, welche gleiche Quellen und Senken hat.

§ 116. Eine Fläche, welche alle elektrischen Stromfäden senkrecht schneidet, welche von allen Strom-

linien senkrecht durchflossen wird, nennt man eine elektrische Niveaufläche. Die gestrichelten Linien in Fig. 55 deuten eine Schaar dieser Niveauflächen an. Durch dieselben wird die Strömung in Niveau-

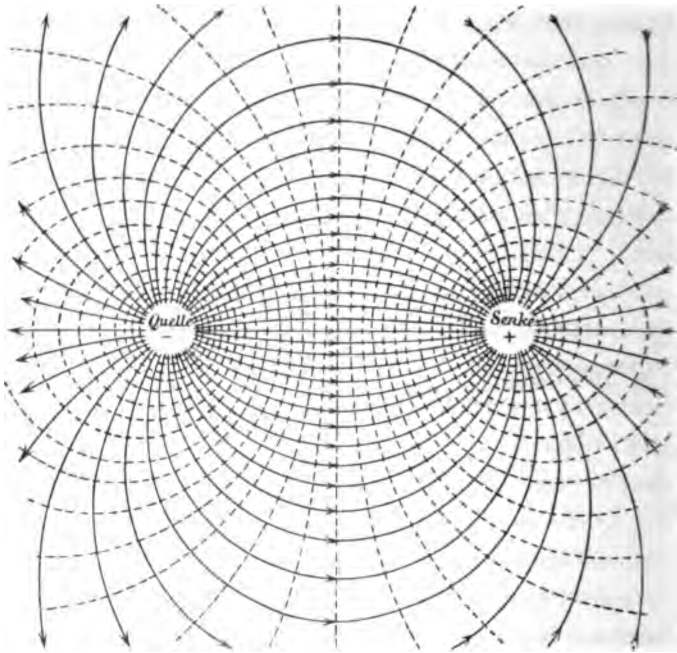


Fig. 55. Elektrische Quelle und Sinkstelle.

schichten und werden die Stromfäden in kurze Stromzellen zerlegt. Die Anzahl der Niveauschichten, in welche der Raum zwischen zwei Niveauflächen zerfällt, heisst die Spannung dieser zwei Niveauflächen. Es gilt das Gesetz, dass die elektrische Strömung in

den längeren Stromzellen minder kräftig, in den kürzesten Stromzellen am kräftigsten ist. In der Nähe der elektrisierten Körper sind also nicht nur die Stromfäden eng, sondern auch die Stromzellen kurz. In

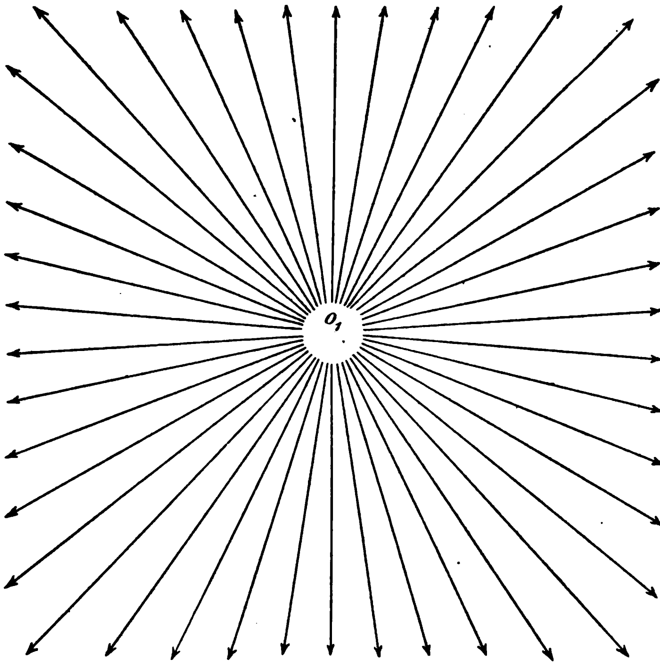


Fig. 56. Elektrische Quelle.

grösserer Entfernung von der Quelle und Senke haben die Stromfäden grossen Querschnitt und die Stromzellen grosse Länge.

Alle diese Stromfäden bestehen aus gleich viel Stromzellen. Die längeren Stromfäden haben also auch grösse-

ren Querschnitt und alle Stromfäden haben denselben Widerstand.[1])

§ 117. Entfernt man den + elektrisierten Körper (Fig. 55), so fliesst der elektrische Strom nun in geraden Stromfäden nach allen Seiten von der Quelle bis zu der Zimmerwand. (Fig. 56.) Nähert man nun eine zweite

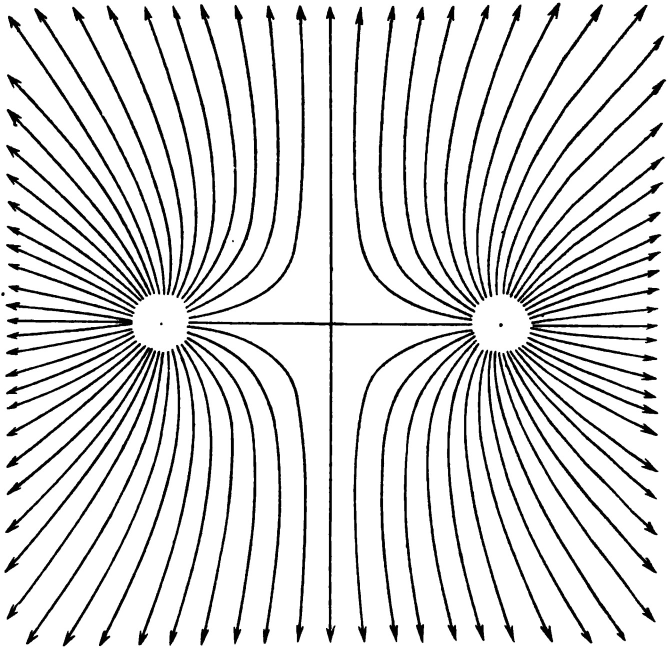


Fig. 57. Zwei elektrische Quellen.

elektrische Quelle, so weichen sich die Stromfäden der beiden Quellen aus (Fig. 57) und verlaufen von den von einander abgewendeten Seiten der beiden Quellen bis zu

---

1) Vergl. § 50 und § 89.

der Zimmerwand. Denkt man sich die Stromrichtung in Fig. 57 überall entgegengesetzt (die Pfeile umgekehrt), so stellt dieselbe die elektrische Strömung dar, welche von der Zimmerwand zu zwei elektrischen Senken (z. B. zu zwei geriebenen Glaskugeln) fliesst.

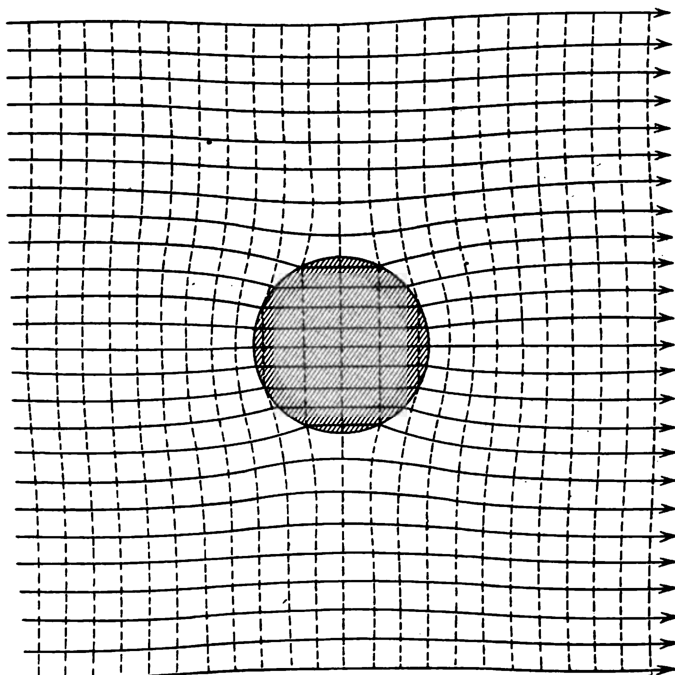


Fig. 58. Kugel aus besser durchlässigem Stoffe in der elektrischen Strömung.

§ 118. Die elektrische Strömung verläuft stets in jenen Bahnen, in welchen sie den kleinsten Widerstand findet. Würde man eine Veränderung der Stromfäden vornehmen, sie z. B. an jenen Stellen wo sie eng

sind erweitern, an jenen Stellen wo sie weit sind enger machen oder ihre Krümmung ändern können, so würde der Widerstand, welchen der Strom nun findet, grösser sein als bei natürlichem Verlaufe desselben. Die elektrische Strömung weicht aus gleichem Grunde den schlecht durchlässigen Stoffen aus und bevorzugt die besser durchlässigen Stoffe. Fig. 58 stellt die Veränderung des Verlaufes dieser Strömung dar, wenn man ihr eine Kugel aus Schwefel in den Weg stellt. Die Strömung sammelt sich in dem Schwefel, durch welchen die Stromfäden eng gedrängt verlaufen, während sie neben der Kugel um so breiter werden.[1]) Ferner bemerkt man die scharfe Brechung oder Knickung der elektrischen Stromfäden an der Oberfläche der Kugel. Man kann aus dem Brechungswinkel die Durchlässigkeit des Stoffes bestimmen, aus welchem die Kugel besteht. Der enormen Durchlässigkeit der Metalle wegen ist die Störung des Verlaufes der Stromlinien, welche eine Metallkugel (Fig. 59) hervorbringt, noch grösser und verlaufen dann die Stromfäden ganz senkrecht gegen die Oberfläche des Metalles.[2]) Deshalb sind die Oberflächen metallener Körper oft Niveauflächen der elektrischen Strömung (siehe § 116), denn die Stromlinien fliessen nur in den in der IV. Vorlesung behandelten Fällen schief aus einer Metalloberfläche.

§ 119. Wir haben in § 112 erfahren, dass eine blecherne Büchse, welche man über eine elektrische Quelle stülpt, der hohen Durchlässigkeit der Metalle

---

[1]) Vergl. § 46 und § 92.
[2]) Vergl. Fig. 21 § 47.

wegen nicht hindert, dass die elektrische Strömung der Quelle durch sie hindurchdringt und ein ausserhalb stehendes elektrisches Fähnchen ablenkt. Stülpt man jedoch einen

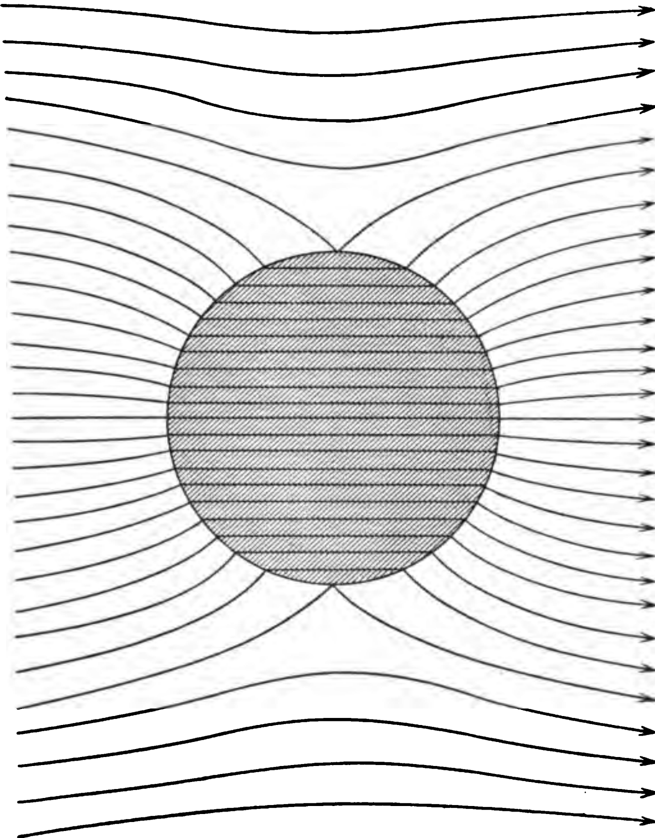


Fig. 59. Metallkugel in der elektrischen Strömung.

Blechtopf oder auch nur einen Sturz aus Drahtgeflecht über das Fähnchen, so ist dasselbe vor jeder von aussen kommenden elektrischen Strömung geschützt. Der

hohen Durchlässigkeit der Metalle wegen verläuft dieselbe nämlich gänzlich in der Wand des Sturzes, ohne in das Innere desselben einzudringen.

§ 120. Sehr oft verwendet man als Quellen oder Senken der elektrischen Strömung Metallstücke, welche man (z. B. durch Berührung mit einem geriebenen Stab)

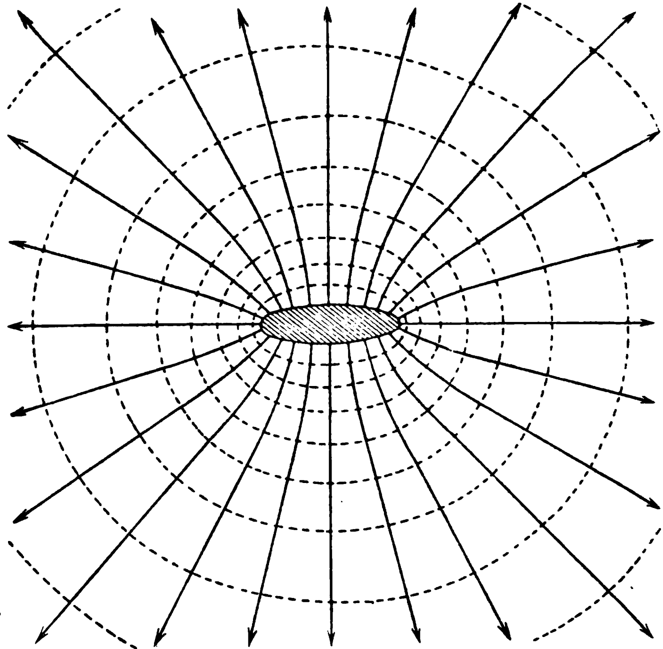


Fig. 60. Spitzenwirkung.

elektrisiert hat. Die Oberfläche dieser Metallkörper ist immer eine Niveaufläche. Wenn diese Oberfläche nicht genaue Kugelform, sondern flachere Stellen und hervorspringende Spitzen hat, so fliesst die Strömung aus letzteren mit grösserer Stärke hervor. Die Stromfäden, welche

von den Spitzen ausgehen, sind enger als die Stromfäden, welche von den flacheren Stellen des Metallkörpers entspringen. Fig. 60 stellt die Stromfäden und Niveauflächen in der Umgebung eines ellipsoidischen Metallkörpers, welcher Quelle oder Senke der Strömung ist, dar. Man erhält Fig. 60, wenn man die gleichmässige Strömung, welche von einer Kugel ausgeht, so abzeichnet, dass man die Höhendimensionen verkleinert, die Breitendimensionen aber belässt. Die Kugel wird damit als Ellipsoid abgebildet, gewissermassen breit gequetscht, und es ergeben sich durch diese Abbildung auch die richtigen Stromfäden, welche von dem Ellipsoid ausgehen und welche also an den schärfer gewölbten rechts und links liegenden Stellen des Ellipsoids enger zusammengedrängt sein müssen.

§ 121. Da die elektrische Strömung so ungemein leicht durch Metalle fliesst, so zieht sie den Weg durch einen noch so langen und dünnen Metalldraht jedem noch so kurzen und breiten Weg durch einen nichtmetallischen Stoff vor. Man kann deshalb die elektrische Strömung durch Metalldrähte nach beliebigem Orte, auch in enorm grosse Entfernung fortleiten. Gegenwärtig sind alle Städte, ja der ganze Erdball von einem dichten Netz elektrischer Drahtleitungen umspannt. Selbst der Blitz bevorzugt den Weg durch einen Metalldraht und deshalb haben die Blitzableiter einigen Nutzen.

4. Die Kondensatoren.

§ 122. Um auch in nicht metallischen, also schlecht durchlässigen Stoffen der elektrischen Strömung eine gute

Bahn zu bereiten, muss man dieselbe möglichst kurz und ihren Querschnitt gross machen. Diese gut durchlässigen Strombahnen nennt man Kondensatoren.

Ein Kondensator besteht aus zwei Metallplatten, welche nahe und parallel zu einander stehen und zwischen welchen eine Luftschicht oder eine Glasplatte, auch eine Öl- oder Paraffinschicht oder eine Glimmerplatte etc. sich befindet. Der elektrische Strom wird der einen Metallplatte mittels eines Metalldrahtes zugeleitet, geht durch die Luft-, Glas- oder Ölschicht (durch das „Dielëktrikum") zu der anderen Metallplatte, von welcher er durch einen Metalldraht weiter geleitet werden kann.

Die elektrische Strömung fliesst senkrecht[1]) zu den beiden Metallplatten von der einen zu der anderen durch das Diëlektrikum, die Stromfäden in dem Kondensator sind also sehr kurz und alle gleich breit, denn die Strömung fliesst zwischen jeder Stelle der beiden Metallplatten mit gleicher Stärke über. (Siehe Fig. 61).

§ 123. Die Durchlässigkeit eines Kondensators ist deshalb desto grösser: 1. je grösser die Fläche der Metallplatten ist, denn desto grösseren Querschnitt hat dann der dem Strome gebotene Weg; 2. je kleiner die Distanz der beiden Metallplatten ist, denn desto kürzer ist dann der von der elektrischen Strömung in dem Diëlektrikum zurückgelegte Weg und 3. je besser durchlässig der Stoff zwischen den Metallplatten (das Diëlektrikum) ist.

Ein Kondensator, dessen Platten 100 qcm Fläche haben, 0,5 cm von einander entfernt sind und durch

[1]) Siehe § 118.

Luft von einander getrennt sind, hat eine 80 mal kleinere Durchlässigkeit als ein Kondensator, welcher aus

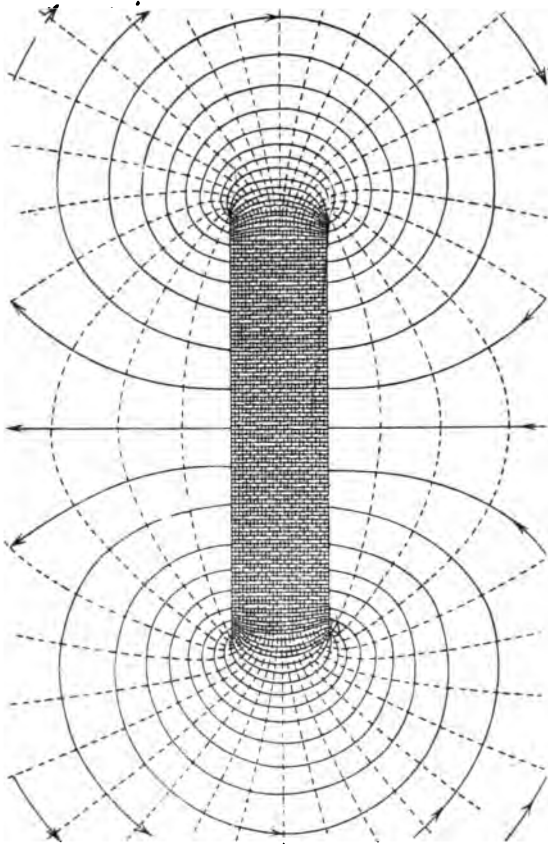


Fig. 61. **Stromfäden und Niveauflächen in einem Kondensator.**

einer Glasplatte von 0,1 cm Dicke besteht, auf welche beiderseits Stanniolplatten von 200 qcm Fläche aufgeklebt sind. Denn es ist in letzterem Kondensator der Strom-

weg 5 mal kürzer, weil seine Metallplatten einander 5 mal näher stehen als jene des ersten Kondensators, ferner ist der Stromweg des zweiten Kondensators 2 mal breiter, weil die Metallplatten desselben die doppelte Fläche haben, und endlich ist das Glas 8 mal durchlässiger als die Luft. ($5 \times 2 \times 8 = 80$.) Daher die 80 mal grössere Durchlässigkeit des zweiten Kondensators.

§ 124. Statt einer Glasplatte kann man auch eine Glasflasche verwenden, welche innen und aussen mit Stanniol beklebt ist, jedoch so, dass der Hals derselben frei bleibt (Leydnerflasche oder Kleist'sche Flasche). Die elektrische Strömung wird der inneren Stanniolbelegung durch einen Draht zugeleitet, fliesst senkrecht durch das Glas der Flasche zu der äusseren Stanniolbelegung und kann von dieser durch einen Draht weiter geleitet werden.

5. Die elektrische Menge. Neben- und hintereinander geschaltete Kondensatoren.

§ 125. Es wurde in § 115 erwähnt, dass sich jede elektrische Strömung derart in Stromfäden zerlegen lässt, dass, je stärker dieselbe an irgend einer Stelle ist, desto enger dort die Stromfäden sind.

Die Anzahl der Stromfäden, welche von einem negativ geladenen Körper wegfliessen, nennt man die elektrische Strommenge, welche von ihm ausgeht, oder kurz seine elektrische Menge oder Ladung. Von dem Körper — in Fig. 55 gehen z. B. 42 Stromfäden aus, er hat also die elektrische Menge —42. Die An-

zahl der Stromfäden, welche zu einem (positiv) geladenen Körper hingehen, bezeichnet man ebenso als seine elektrische Menge, doch versieht man diese Zahl mit dem anderen Vorzeichen. Der Körper + (Fig. 55) hat die elektrische Menge + 42, weil zu ihm 32 Stromfäden hinfliessen.

Die Metallkugel in Fig. 59 empfängt auf der linken Seite 20 Stromfäden, diese Hälfte der Kugel hat also die Ladung + 20, die andere Hälfte der Kugel hat aber die Ladung — 20, weil sie 20 Stromfäden nach rechts aussendet. Im ganzen hat die Kugel die Ladung Null, sie ist weder Quelle noch Senke der Strömung, sondern wird von dieser nur durchflossen.

§ 126. Nimmt man irgend welche Veränderungen in der Nähe eines + oder — geladenen Körpers A vor, indem man z. B. andere Körper ladet, nähert, entfernt oder ausladet, ohne jedoch dem Körper A allzu nahe zu kommen oder ihn zu berühren, so bleibt die elektrische Menge dieses Körpers unverändert, die Stromfäden, welche von ihm ausgehen oder in ihm enden, können ihren Verlauf, ihre Ansatzstelle, ihre Dicke ändern, aber ihre Zahl bleibt unverändert.

§ 127. Wenn die Platten zweier Kondensatoren I und II nach Fig. 62 durch Metalldrähte verbunden sind, so dass die elektrische Strömung, welche durch den Draht α zugeleitet werden und durch den Draht β abfliessen kann, so fliesst ein Teil der Strömung durch den einen, ein anderer Teil derselben durch den nebengeschalteten Kondensator, und zwar verteilt sich die Strömung auf die beiden Kondensatoren im Verhältnis

der Durchlässigkeit derselben (siehe § 123). Wenn man die beiden Kondensatoren, deren Durchlässigkeit in § 123 verglichen wurde, nebeneinander schaltet und eine elektrische Strömung durch beide schickt, so fliessen durch den einen Kondensator 80 mal mehr Stromfäden als durch den anderen, weil die Durchlässigkeit des ersten (nach § 123) 80 mal grösser ist.[1])

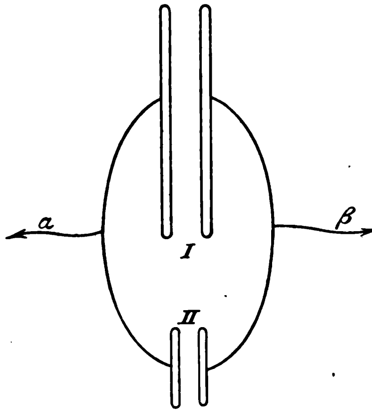


Fig. 62. Nebeneinander geschaltete Kondensatoren.



Fig. 62a. Nebeneinander geschaltetete Leydnerflaschen.

§ 128. Wir haben bisher meist Kondensatoren betrachtet, deren einer Platte die Strömung zugeleitet, von deren zweiter Platte sie abgeleitet wird, welche Kondensatoren also von der Strömung nur passiert werden.

Man kann aber auch (z. B. durch Berührung mit geriebenen Stäben) die eine Platte eines Kondensators zu

---

[1]) Es gilt dieses Verteilungsgesetz übrigens nur dann, wenn keine elektrischen Wirbel vorhanden sind, in welchem Falle die Strömung sich ganz anders auf die beiden Kondensatoren verteilen, ja sogar in beiden entgegengesetzte Richtung einschlagen kann.

einer echten Quelle, die andere Platte zu einer Senke der Strömung machen. Dieselbe fliesst auch in diesem Falle zwischen den Platten senkrecht durch das Diëlektrikum. Nur sehr wenige breite Stromfäden verlieren sich von diesem freistehenden geladenen Kondensator nach aussen.

Stellt man mehrere solche gleichgeladene Kondensatoren hintereinander und verbindet man immer die Senkplatte des einen mit der Quellplatte des nächsten Kondensators (Kaskadenbatterie, Fig. 63) durch einen Draht, so ändert dies fast nichts an den in den Kondensatoren vorhandenen Strömungen und es fliesst dann gewissermassen ein und derselbe Strom hintereinander durch alle Kondensatoren der Batterie.

Schaltet man nun einen gleichen Kondensator *B*, Fig. 63a, neben die Kaskadenbatterie *A*, indem man die eine Platte dieses Kondensators mit der Quellplatte des ersten Kondensators der Batterie, die zweite Platte desselben mit der Senkplatte des letzten Kondensators der Batterie verbindet, so hat nun der Strom zwei Wege zur Wahl, er kann durch die Batterie oder durch den Kondensator *B* fliessen. Da nun der Weg durch die Batterie viel länger ist, so verlassen viele Stromfäden diesen Weg und drängen sich in dem Kondensator *B* zusammen, in welchem also ein besonders heftiger Strom auftritt.

Die Umschaltbatterie von Mach (Fig. 63b) gestattet die Flaschen während der Ladung nebeneinander zu verbinden und sie in geladenem Zustande zu einer Kaskadenbatterie zu formieren. Die anfangs nebeneinander

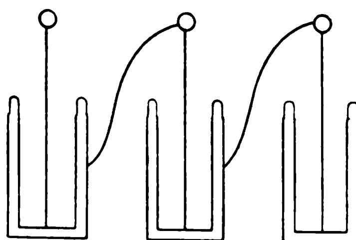


Fig. 63.

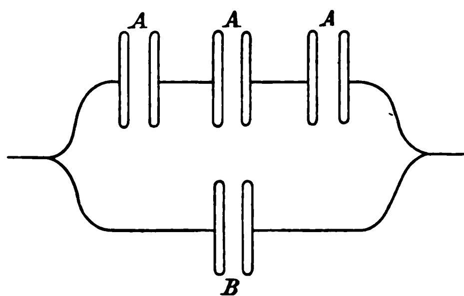


Fig. 63a.

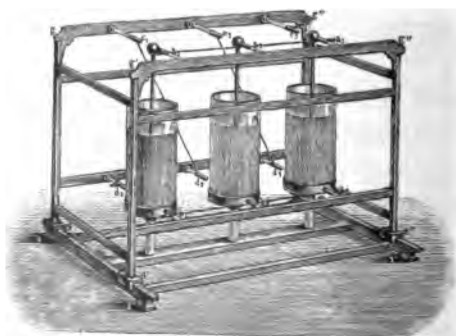


Fig. 63b.

Fig. 63, Fig. 63a, Fig. 63b. Kaskadenbatterie.

fliessenden Stromfäden der drei Flaschen, sind dann hintereinander zusammengefügt. Die Zahl der Stromfäden wird hierdurch 3 mal kleiner, die Länge der Stromfäden, und also auch ihre Spannung, wird aber 3 mal grösser.

6. Die Kontraktilität der elektrischen Strömung.

§ 129. Die elektrische Strömung nimmt nicht nur jenen Verlauf, in welchem sie den kleinsten Widerstand findet, sondern sie sucht auch jene Körper von welchen sie ausgeht und durch welche sie fliesst, so zu verschieben, dass der Widerstand des von ihr durchströmten Raumes möglichst klein wird, und sie vermag hierbei nicht unbeträchtliche Kraft zu äussern. Jeder Stromfaden derselben sucht seinen Widerstand zu verkleinern, also kürzer und breiter zu werden, und vermag während dieser Kontraktion Arbeit zu leisten.

Das Bündel elektrischer Stromfäden, welches von einer Quelle zu einer Sinkstelle (Fig. 55) geht, wirkt also wie ein Muskel und zieht die beiden Körper gegen einander hin (Anziehung eines positiv und eines negativ geladenen Körpers). Die tierischen Muskel sind vielleicht wirklich nichts anderes als Apparate, welche dieser natürlichen Kontraktion der elektrischen Strömung angepasst sind und in welchen dieselbe zu einem hohen Grade gesteigert ist. Dass nämlich die Muskel elektrische Apparate sind, steht ausser Zweifel. Die äusserst kräftig wirkenden elektrischen Organe der Zitterrochen und der Zitteraale sind nichts anderes als modifizierte

Muskel, und es ist bekannt, wie sehr die Kontraktilität der Muskel durch elektrische Ströme beeinflusst wird, welche man durch sie hindurchsendet.

Zwei elektrische Quellen (Fig. 57) oder auch zwei elektrische Senken werden zufolge der Kontraktilität der elektrischen Stromfäden von einander gezogen, stossen sich also scheinbar ab, weil die elektrische Strömung nicht zwischen ihnen übergeht, sondern von jeder nach aussen gegen die Zimmerwände hin, so dass dieselbe, indem sie sich kontrahiert, die beiden Quellen (bezw. die beiden Senken) von einander entfernt. (Abstossung gleichnamig geladener Körper.)

Das elektrische Fähnchen (§ 109) besteht aus geriebenem Hartgummi, ist also selbst eine elektrische Quelle und wird deshalb von einem geriebenen Hartgummistabe abgestossen, von einem Glasstabe angezogen.

§ 130. Ein sehr brauchbares Instrument zum Nachweise der elektrischen Strömung ist folgendes Aluminiumblatt-Elektroskop (Fig. 64). Dasselbe ist im wesentlichen ein kleiner Kondensator, welcher aus zwei auf Glasstützen stehenden Metallplatten P_1 und P_2 besteht, deren einer der elektrische Strom durch den Draht d_1 zugeleitet werden kann, während er von der anderen Platte durch den Draht d_2 abgeleitet wird, und zwar wird gewöhnlich der Draht d_2 bis zu der Wasser- oder Gasleitung oder zu den Zimmerwänden geführt („zur Erde“ abgeleitet).

An der Innenseite der Kondensatorplatten hängen zwei Blättchen von Aluminiumfolie (a_1 und a_2). Die

elektrische Strömung, welche zwischen denselben übergeht, zieht zufolge ihrer Kontraktilität die Aluminiumblättchen desto stärker gegen einander hin, je stärker sie ist.

Man kann also aus der Grösse des Ausschlages der Blättchen die Stärke der Strömung erkennen.

§ 131. Das Elektroskop wird auch oft ohne den Zuleitungsdraht d_1 (Fig. 64) gebraucht. Nähert man der

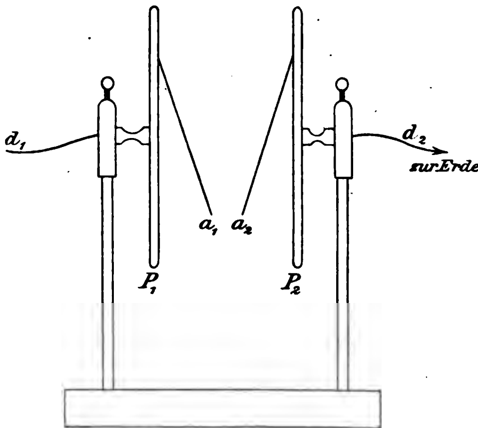


Fig. 64. Elektroskop.

Platte P_1 von links einen geriebenen Hartgummistab, so fliesst die Strömung aus diesem in die Platte P_1, dann durch das Elektroskop, so dass die Blättchen spreizen und dann weiter durch den Draht d_2 zur Erde. Entfernt man den Stab, so geht dessen Strömung nicht mehr durch das Elektroskop und die Blättchen fallen wieder nieder und legen sich an die Platten P_1 bezw. P_2 an.

Ein geriebener Glasstab wirkt ebenso. Nähert man denselben der Platte P_1, so kommt nun die Strömung aus P_2, fliesst durch das Elektroskop, allerdings in umgekehrter Richtung wie vorher, zieht aber die Blättchen ebenfalls gegen einander und fliesst dann aus P_1 in den Glasstab, welcher Senke der Strömung ist. Entfernt man den Stab, so fallen die Blättchen nieder.

In beiden Fällen ist die Platte P_1 weder Quelle noch Senke der Strömung, sondern wird von derselben nur passiert.

§ 132. Anders, wenn man die Platte P_1 (z. B. durch Berührung mit einem Hartgummistab) selbst zu einer elektrischen Quelle macht. Die Blättchen spreizen dann dauernd, weil die von P_1 ausgehende Strömung dauernd durch das Elektroskop nach P_2 und durch d_2 zur Erde fliesst.

Nähert man nun einen geriebenen Hartgummistab oder irgend eine elektrische Quelle von links der Platte P_1, so fliesst deren Strömung nach P_2 und durch das Elektroskop und verstärkt die Strömung, welche dort schon vorher vorhanden war, so dass die Blättchen so lange stärker spreizen, als die Quelle in der Nähe von P_1 bleibt.

Nähert man hingegen einen geriebenen Glasstab oder irgend eine elektrische Senke von links der Platte P_1, so fliesst nun ein Teil der Strömung, deren Quelle die Platte P_1 ist, nicht mehr durch das Elektroskop, sondern in die links stehende Senke, und die Blättchen spreizen weniger stark. Nähert man die Senke noch mehr an die Platte

P_1, so fliesst die ganze Quellströmung dieser Platte nach links in die Senke, im Elektroskop ist dann keine Strömung und die Blättchen fallen nieder. Nähert man die Senke noch weiter, so fliesst nicht nur die ganze Quellströmung der Platte P_1 nach links, sondern auch aus der Platte P_2 fliesst eine elektrische Strömung nach links durch das Elektroskop (so dass die Blättchen nun wieder spreizen) in P_1 und weiter in die Senke.

Nähert man eine geriebene Siegellackstange von links diesem geladenen Elektroskop, so spreizen die Blättchen stärker, dieselbe ist also eine elektrische Quelle. Nähert man das Pelzwerk, mit welchem man eine Hartgummistange gerieben hat, von links dem Elektroskop, so spreizen die Blättchen weniger stark, dieses Pelzwerk ist sonach Senke der Strömung (siehe § 111). Man kann also mit Hilfe des geladenen Elektroskops leicht erkennen, ob ein Körper Quelle oder Senke der Strömung ist.

§ 133. Um zu bestimmen, wie gross die Kraft ist, mit welcher sich die elektrische Strömung zu verkürzen strebt, verwendet man das absolute Elektrometer.

Dasselbe ist ein Kondensator, dessen eine Platte P_1 (Fig. 65) auf einem Glasstabe fest steht, dessen andere Platte P_2 darüber an einer Wage hängt, welche zur Erde abgeleitet ist.

Geht eine elektrische Strömung zwischen den Platten P_1 und P_2 über, so zieht dieselbe die Platte P_2 nach unten mit einer Kraft, welche sich leicht abwiegen lässt.

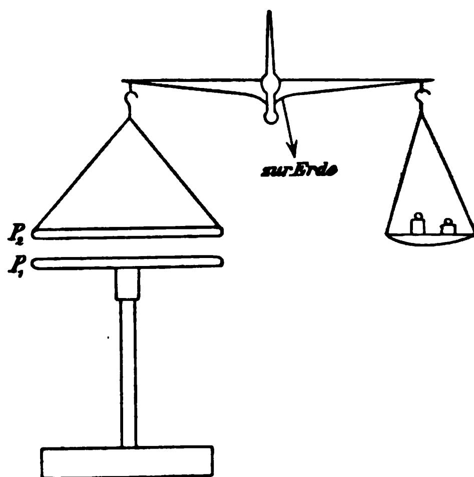


Fig. 65. Absolutes Elektrometer.

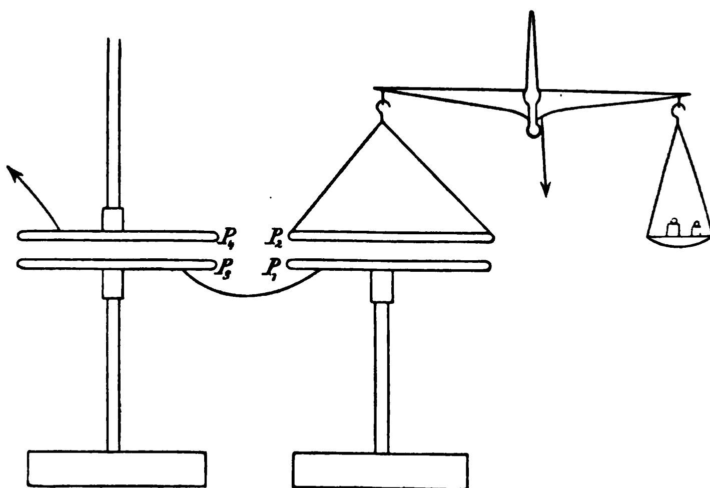


Fig. 66. Kondensator neben das Elektrometer geschaltet.

Wir machen die Standplatte P_1 durch Berührung mit einem Hartgummistab zur Quelle der elektrischen Strö-

mung und konstatieren, dass die Platte P_2 z. B. mit einer Kraft von 2 g nach abwärts gezogen wird, da 2 g auf der anderen Wagschale das Gleichgewicht halten.

Nun schalten wir einen zweiten gleichen Kondensator $P_3 P_4$ (Fig. 66) neben das Elektrometer. Es fliesst jetzt nur mehr die halbe Strömung durch dieses, während die anderen Stromfäden durch den Kondensator $P_3 P_4$ gehen. Die Elektrometerplatte P_2 wird jetzt nur mehr mit der Kraft $^1/_2$ g nach abwärts gezogen. Die Strömung ist halb so stark, die Verkürzungskraft derselben aber 4 mal kleiner geworden.

Die Kraft, mit welcher sich die Strömung kontrahiert, ist unter sonst gleichen Umständen 4, 9, 16 mal grösser, wenn die Stromfäden 2, 3, 4 mal zahlreicher werden. Die dünneren Stromfäden kontrahieren sich also mit grösserer Kraft als die dicken Stromfäden.

§ 134. Es hat jedoch auch der Stoff, in welchem die Strömung verläuft, auf die Grösse dieser Kontraktionskraft Einfluss.

Um dies zu erkennen, machen wir beide Platten eines Kondensators beweglich und hängen jede an eine Wage (Fig. 67), tauchen jedoch die Platte P_1 unter Öl, während die Platte P_2 über der Oberfläche in Luft sich befindet. Senden wir nun eine elektrische Strömung durch diesen Kondensator, so wird die Platte P_2 nach unten, die Platte P_1 nach oben gezogen, letztere jedoch nur mit der halben Kraft. Die Zusammenziehungskraft der Stromfäden ist also in Öl kleiner als in Luft, sie ist desto kleiner je grösser die Durchlässigkeit des Stoffes ist, in welchem sie verlaufen.

Die Öloberfläche wird bei dieser Anordnung nach oben gezogen, denn jeder Stromfaden, welcher dieselbe

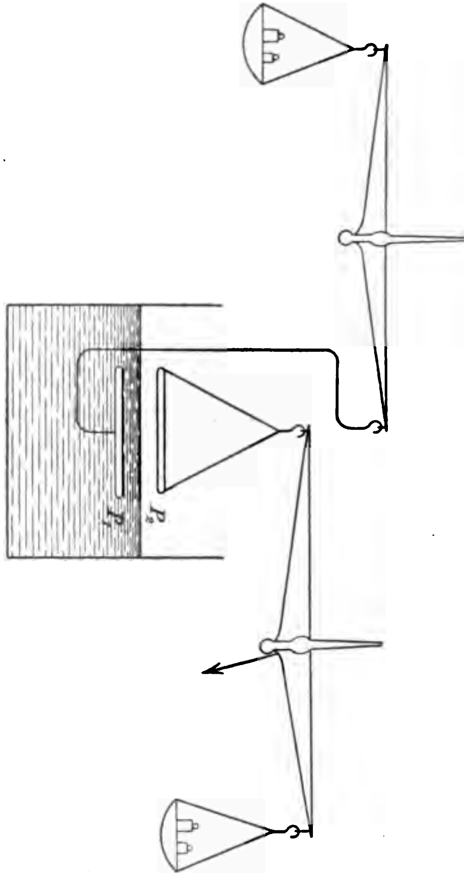


Fig. 67. Kontraktilität der Strömung in Öl.

senkrecht durchfliesst, kontrahiert sich in seinem oberen in Luft verlaufenden Teile stärker als in einem unteren in Öl verlaufenden Teile.

Verwendet man Quecksilber statt des Öles, so haben die in diesem eventuell verlaufenden Stromfäden der enormen Durchlässigkeit des Quecksilbers wegen keine merkliche Kontraktilität. Die Platte P_1 wird dann gar nicht mehr nach oben gezogen, hingegen wird die Quecksilberoberfläche mit derselben Kraft nach oben gezogen, mit welcher die Platte P_2 nach unten gezogen wird.

7. Die elektrische Strömung länger zu machen.

§ 135. Wenn man die Platten eines geladenen Kondensators auseinander zieht, so wird hierdurch die elektrische Strömung, welche zwischen diesen Platten übergeht länger ohne schwächer zu werden, denn die Anzahl der Stromfäden derselben ändert sich hierbei nicht (siehe § 126). Man hat damit elektrische Strömung gewonnen, neue Stromzellen erzeugt, die Zahl der zwischen den Platten des Kondensators vorhandenen Niveauschichten vergrössert (die Spannung der Kondensatorplatten erhöht[1]). Allerdings hat man diese Strömung nicht umsonst erhalten, sondern man musste die Kontraktionskraft derselben überwinden und also entsprechende Arbeit leisten, welche wieder gewonnen wird, wenn sich die Strömung kontrahiert.

Auf dieser Gewinnung der elektrischen Strömung durch Auszerren derselben beruhen die Influenzmaschinen, welche wir in § 144 beschreiben werden, und welche gegenwärtig allgemein an Stelle der Reibungselektrisiermaschinen verwendet werden.

---

[1]) Siehe § 116.

Da man also durch Arbeit elektrische Strömung herstellen kann, so kann man den Arbeitswert jeder auch der kompliziertesten Strömung leicht angeben. Derselbe hängt nur von der Anzahl der Stromzellen ab. Man kann die Breite der Stromfäden immer so bemessen, dass jede Stromzelle jeder elektrischen Strömung den Arbeitswert 1 Erg hat.[1])

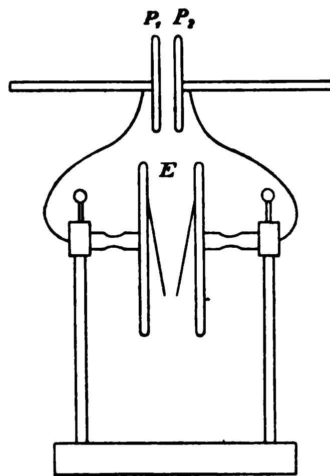


Fig. 68. Volta'sches Elektroskop.

Die Strömung, welche von einem mässig geriebenen Hartgummistab ausgeht, hat ungefähr den Arbeitswert von 1 000 000 Erg = $^1/_{20\,000\,000}$ Heller. Die Arbeit, welche man zum Reiben verwendet, hat aber einen viel höheren Wert, so dass die Reibungselektrisiermaschinen sehr unökonomisch arbeiten.

§ 136. Durch dieses Auszerren des Stromes wird die Anzahl der Stromfäden desselben nicht geändert, wohl aber die Anzahl der Niveauschichten der Strömung erhöht, also die Spannung der Kondensatorplatten gesteigert.

Ladet man einen Kondensator, dessen Platten $P_1 P_2$ (Fig. 68) einander sehr nahe stehen, so kann die Anzahl

[1]) Vergl. § 39.

der Stromfäden, welche zwischen diesen Platten übergehen, eine sehr grosse sein, und doch die Zahl der Niveauschichten der Kürze dieser Stromfäden wegen sehr gering, d. h. die Spannung des Kondensators sehr klein sein. Schaltet man ein Elektroskop E neben diesen Kondensator (Fig. 68), so wird der hohen Durchlässigkeit des letzteren wegen fast nichts von der Strömung den Weg durch das Elektroskop einschlagen. Zieht man nun aber die Platten P_1 und P_2 des Kondensators auseinander, so wird seine Durchlässigkeit viel kleiner, eine beträchtliche Anzahl der Stromfäden, welche früher in ihm vorhanden waren, zieht nun den Weg durch das Elektroskop vor und die Blättchen desselben spreizen.

Man kann so eine sehr geringe Spannung eines Kondensators (dessen Platten sehr nahe stehen), welche mit dem Elektroskop (durch Nebenschaltung eines Elektroskops) nicht direkt erkennbar ist, noch nachweisen (Volta's Methode).

DRITTE VORLESUNG.

Die elektrische Entladung.

1. Mitteilung der Ladung durch Berührung.

§ 137. Die Eigenschaft eines Körpers, die elektrische Strömung auszusenden oder zu empfangen, Quelle oder Senke dieser Strömung zu sein, lässt sich durch einfache Berührung auf einen anderen Körper übertragen. Berührt man mit einem geriebenen Hartgummistab eine auf einem Glasfuss stehende Metallkugel, so ist diese nun eine elektrische Quelle geworden und behält diese Eigenschaft auch bei, wenn der Hartgummistab entfernt wird. So einfach diese Mitteilung scheint, durch so merkwürdige und komplizierte Vorgänge wurde sie vermittelt, welche in ungemein kurzer Zeit an der Berührungsstelle vor sich gegangen sind. Dieselben werden uns noch viel beschäftigen. Beachten Sie vorerst nur den elektrischen Funken, welcher an der Berührungsstelle überspringt und welcher nichts anderes ist als ein wirklicher Blitz in kleinstem Massstabe.

Man kann die elektrische Ladung von einem Körper durch Berührung auf einen anderen übertragen, der erste

verliert aber dabei so viel Wirksamkeit als der zweite gewinnt. Berührt man mit einer Metallkugel, welche Quelle der elektrischen Strömung ist, eine zweite noch ungeladene Metallkugel, so wird auch diese hiedurch eine elektrische Quelle. Die Anzahl der Stromfäden, welche nun von beiden Kugeln ausgehen, ist aber gerade so gross als die Zahl der Stromfäden, welche die erste Kugel anfänglich allein aussendete.

§ 138. Wenn auch kein Verlust an Stromfäden bei dieser Übertragung der Ladung eintritt, so verliert die Strömung dabei doch immer an Energiewert.

Nähern wir zwei Metallkugeln, von welchen die erste eine Quelle, die andere eine ebenso starke Senke ist (Fig. 55) bis zur Berührung, so wird das Strombündel, welches zwischen ihnen übergeht, immer kürzer (Fig. 69). Die Stromfäden drängen sich hierbei immer mehr in dem Zwischenraume zwischen beiden Kugeln zusammen und werden sehr dünn (vergl. Fig. 69 mit Fig. 55), die Strömung wird in diesem Zwischenraume immer heftiger, während sie im übrigen Aussenraume immer schwächer wird. Endlich geht diese heftige Strömung in der Verbindungslinie in einen elektrischen Funken über. Sie verwandelt sich hierbei in Wärme und Licht und die beiden Kugeln sind damit unelektrisch (entladen).

Es ist diese Entladung kein wesentlich anderer Vorgang als die in § 137 behandelte Mitteilung der Ladung. Von der elektrischen Quelle (§ 137) gehen anfänglich Stromfäden gegen die unelektrische Kugel, durchdringen dieselbe und fliessen weiter gegen die Zimmerwand. (Fig. 70.) Jenes Stück dieses Strombündels, welches zwischen den

beiden Kugeln verläuft, wird bei der Berührung derselben vernichtet und liefert den Funken, so dass von nun an dieses Strombündel seinen Ausgang von der anfäng-

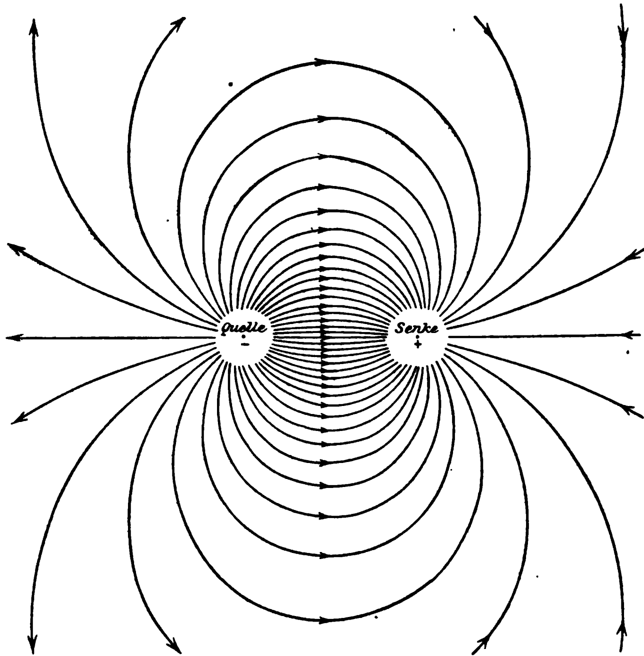


Fig. 69. **Elektrische Quelle und Senke einander genähert.**

lich ungeladenen Kugel nimmt. In § 140 kommen wir nochmals hierauf zurück.

2. Entladung durch einen Metalldraht.

§ 139. Statt zwei verschieden geladene Metallkörper einander zu nähern und sie zu berühren kann man sie mit demselben Erfolge durch einen Draht verbinden.

Sofort fliesst das elektrische Strombündel, welches anfänglich durch die Luft zwischen den beiden Körpern überging, nun durch den Draht, weil dieser unvergleichlich durchlässiger ist als die Luft. Aber schon im nächsten Augenblicke verwandelt sich die Strömung in dem Drahte in Wärme und ist damit vernichtet. So wie der Metalldraht wirkt auch eine feuchte Schnur, ein feuchter Holzstab, ja selbst ein feuchter Glasstab. Die Glasstützen, auf welchen elektrisierte Körper aufgestellt werden, müssen deshalb recht trocken sein, weil sich sonst diese Körper sehr bald entladen. Diese entladende Wirkung haben alle sehr gut durchlässigen Stoffe (Metalle, wässerige Lösungen, tierische und pflanzliche Substanzen, auch der menschliche Körper). Man nennt Stoffe, in welchen sich die elektrische Strömung sehr bald in Wärme verwandelt, Leiter oder leitende Substanzen, weil sie die Übertragung der Ladungen vermitteln können.

Von den zwei Platten eines geladenen Kondensators ist die eine Quelle, die andere Senke der elektrischen Strömung. Verbindet man diese Platten auch nur einen Augenblick durch einen irgendwie angelegten Metalldraht, so sind sie sofort völlig entladen.

Das genauere Studium dieses Vorganges: der Entladung eines Kondensators durch einen Draht — führte in den letzten Jahrzehnten zu bewunderungswürdigen Entdeckungen, über welche jedoch erst in der neunten Vorlesung berichtet werden kann.

Beschränken wir uns hier darauf, eine Reihe von Anwendungen der beiden Entladungsformen: der Ent-

ladung durch einen elektrischen Funken und der Entladung durch einen Draht zu beschreiben.

3. Ladung durch Verbindung mit der Erde.

§ 140. Ein elektrischer Metallkörper *A* stehe in der Nähe einer ungeladenen Metallkugel *B* (Fig. 70). Die

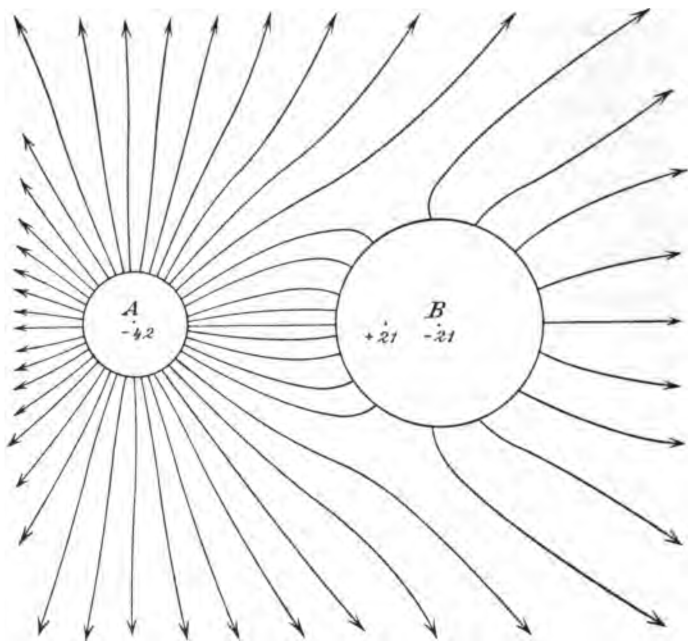


Fig. 70. Influenzierte Ladungen.

meisten Stromfäden gehen von *A* nach allen Seiten zu der Zimmerwand. Ein Strombündel von 8 Stromfäden geht jedoch zu der ungeladenen Kugel *B* und versinkt in dieselbe, tritt dann auf der abgewandten Seite dieser Kugel wieder hervor und geht nach rechts weiter zu der Zimmerwand.

Verbindet man nun die Quelle *A* mittels eines Drahtes, wenn auch nur für einen Augenblick, mit *B*, so wird das Strombündelstück, welches von *A* bis *B* geht, zerstört (Fig. 71). Es bleibt also von diesem Strombündel nur das Stück, welches in *B* seinen Anfang nimmt und bis

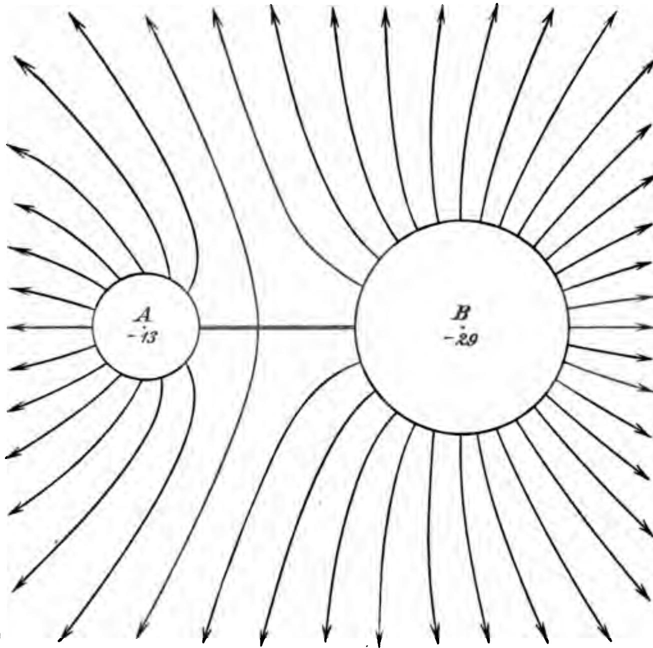


Fig. 71. Mitteilung der Ladung.

zur Zimmerwand geht. *B* ist also hierbei eine Quelle geworden, welche z. B. 29 Stromfäden aussendet. *A* hat dann aber 29 Stromfäden verloren. Es ist dies die uns bereits bekannte Mitteilung der Quellwirkung oder Ladung. Schon das allmähliche Nähern des Verbindungsdrahtes bewirkt hierbei die allmähliche Änderung des Verlaufes

der Strömung Fig. 70 bis zu der Form Fig. 71. Aber erst durch die Funkenbildung wird diese Form beständig, so dass man dann den Draht entfernen kann, wobei die Strömung die Form Fig. 71 behält.

Auch positive Ladung (Senkwirkung) lässt sich so

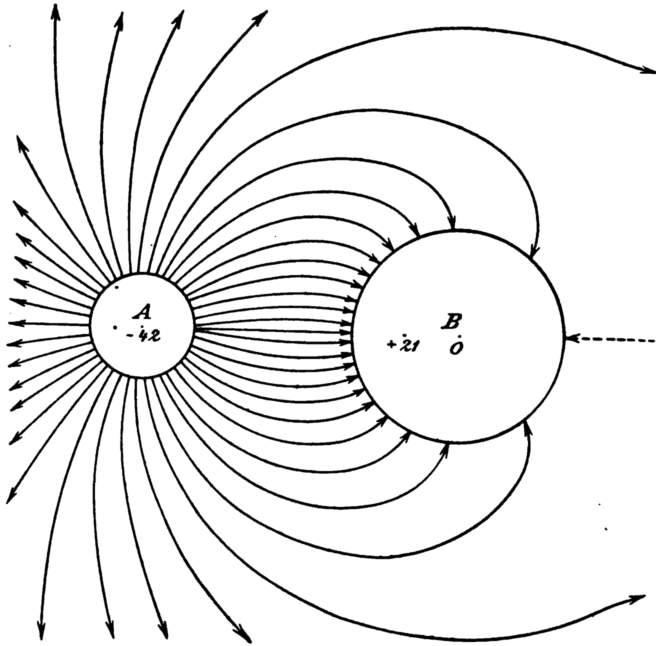


Fig. 72. Ladung durch Ableitung zur Erde.

übertragen. Man kann nämlich die Richtung der Strömung in beiden Figuren und überhaupt in allen von uns noch zu behandelnden Fällen stets auch umgekehrt annehmen, was hiermit ein für alle mal hervorgehoben sein möge.

§ 141. Statt *A* mit *B* durch einen Draht zu ver-

binden, kann man auch *B* (Fig. 70) durch einen Draht mit der Zimmerwand verbinden. Von diesem Augenblicke an gehen keine Stromfäden mehr von *B* zur Wand. Es bleibt also nur das Strombündelstück, welches von *A* nach *B* geht und dort endet. *B* ist hierdurch eine echte Senke für 21 Stromfäden geworden, hat also positive Ladung erhalten (Fig. 72), während *A* nichts von seiner Quellwirkung verloren hat. Wohl aber versinken von nun an 21 Stromfäden weniger in die Zimmerwand.

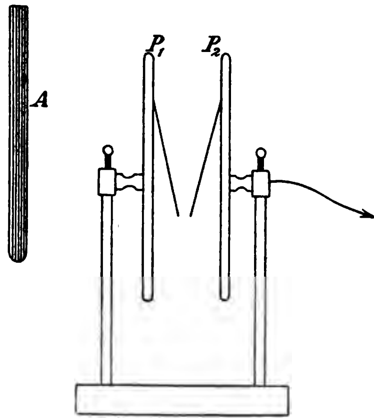


Fig. 73. Ladung eines Elektroskops durch Ableitung zur Erde.

Nähern wir zum Beispiel einen geriebenen Hartgummistab *A* (Fig. 73) einem ungeladenen Elektroskop P_1 P_2, ohne jedoch die Platte P_1 mit demselben zu berühren, so geht ein Teil der Strömung von dem Stabe gegen P_1 und dann von P_1 nach P_2 durch das Elektroskop.

P_2 ist dauernd zur Erde abgeleitet. Verbinden wir jetzt P_1 mit P_2 durch einen Draht, oder berühren wir auch nur P_1 für einen Augenblick mit der Hand, so ist auch P_1 zur Erde abgeleitet und es geht von nun an keine Strömung mehr durch das Elektroskop, so dass die Blättchen niederfallen. Gerade damit ist jedoch die

Platte P_1 geladen, eine echte Senke der Strömung geworden, die von A nur bis P_1 geht, während ihre Fortsetzung vernichtet ist.

Entfernt man nun den Hartgummistab A, so bleibt P_1 Senke der Strömung. Diese fliesst aber nun nicht direkt von A nach P_1, sondern von A zur Zimmerwand, von dieser durch den Draht d_2 in P_2 und von P_2 durch das Elektroskop nach P_1, wo sie endet. Das Elektroskop ist hiermit dauernd geladen.

4. Die Ladung ganz auf einen anderen Körper zu übertragen.

§ 142. Bei der Mitteilung der Ladung durch Berührung oder durch einen übergelegten Draht wird stets nur ein Teil der Ladung von einem Körper auf den anderen übertragen, weil nur eine kleine Anzahl der Stromfäden von dem einen Körper zu dem anderen fliesst. Sorgt man dafür, dass die ganze von dem geladenen Körper ausgehende Strömung gegen den ungeladenen fliesst, so wird die ganze Ladung des ersten auf den zweiten übertragen, wenn man die beiden Körper zur Berührung bringt.

Man erreicht dies am besten, wenn man den zu ladenden Körper hohle Form giebt, z. B. die Form eines Topfes mit Deckel. Wir bringen eine auf einem Glasfuss stehende elektrische Metallkugel A (Fig. 74) in einen blechernen Topf, welcher ebenfalls auf einer Glasstütze ruht und decken denselben mit einem Blechdeckel zu. Nun fliesst die Strömung von A durch das Innere des

Topfes, dann senkrecht durch dessen Wand und aussen von ihm weiter zu der Zimmerwand. Es sieht von nun an aussen so aus, als wäre der Topf bereits eine echte Quelle, während er doch alle Strömung, die er von seiner Aussenseite aussendet, an seiner Innenseite empfängt und nur *A* die echte Quelle ist.

Bringt man nun aber die elektrische Kugel *A* zur Berührung mit der Innenwand des Topfes, so ist damit alle Strömung im Innern des Topfes vernichtet, *A* ist völlig ausgeladen. Die Strömung ausserhalb des Topfes bleibt aber ungeändert bestehen. Der Topf ist eine echte elektrische Quelle geworden, die ganze Ladung von *A* ist auf ihn übertragen. Man kann nun auch (allerdings nur mittels gläserner Handgriffe) den Topfdeckel heben und *A* aus dem Topf entfernen. *A* ist und bleibt dabei unelektrisch.

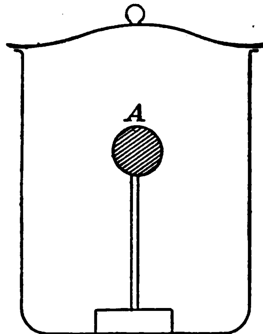


Fig. 74. Faraday's hohler Metallkörper.

5. Multiplikation der Ladung.

§ 143. Man kann durch eine passende Anordnung der oben beschriebenen Entladungsvorgänge, eine anfänglich gegebene geringe Ladung (geringe Anzahl von Stromfäden) ganz beliebig vermehren, freilich unter Aufwendung entsprechender Arbeit. Dieser interessante Vorgang besteht im Prinzip darin, dass man die Stromfäden in kürzere Stücke teilt und diesen dann durch Auszerren



(§ 135) die ursprüngliche Länge giebt. Es gelingt ersteres freilich nur durch oftmalige Ausladungen, also unter fortgesetzten Energieverlusten. Dennoch ist diese Art der Erzeugung neuer Stromfäden sehr ökonomisch und liegt der ganz erstaunlichen Wirksamkeit der Influenzmaschinen zu Grunde.

Wir zeigen diese Multiplikation der Stromfäden mit Hilfe von drei Metallplatten, von welchen zwei (*I* und *II* Fig. 75) auf Glasfüssen feststehen und mit zwei Elektro-

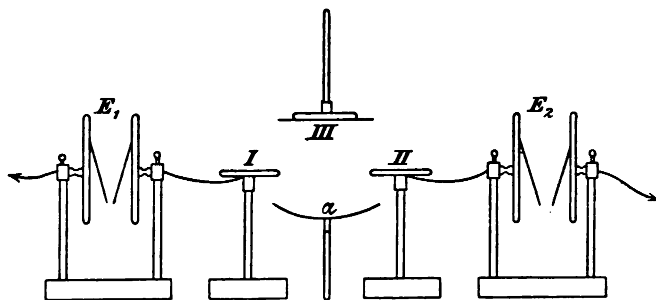


Fig. 75. Multiplikation der Ladung.

skopen (E_1 und E_2) verbunden sein können. Die dritte Platte (*III* Fig. 75) hat einen nach oben gerichteten Glasstiel. Ihre untere Seite ist mit einem Kautschukblatt beklebt. Setzt man diese Platte auf eine der Standplatten *I* oder *II*, so bildet sie mit dieser einen Kondensator von sehr grosser Durchlässigkeit, da das Kautschukblatt nur geringe Dicke hat und Kautschuk 2 mal durchlässiger für die elektrische Strömung ist als Luft. Ferner brauchen wir noch ein Drahtstückchen *α*, welches an einem Glasstiele gehalten werden kann und mit

Hilfe dessen die Platten *I* und *II* verbunden werden können.

Anfänglich habe die Platte *I* eine ganz schwache Ladung, während *II* und *III* unelektrisch sind. Nun führen wir folgende Prozesse aus:

1. Ladung der Platte *III*: Man setzt *III* auf *I* und berührt die obere Seite von *III* einen Augenblick mit dem Finger. Die ganze Strömung, welche von *I* ausgeht, geht nun von *I* nach *III* durch das Kautschukblatt. Nun hebt man *III* wieder ab.

War *I* eine elektrische Quelle, so ist nun *III* nach § 141 eine ebenso starke Senke geworden, ohne dass *I* an Wirkung verloren hat. Während des Abhebens haben wir die zwischen *I* und *III* übergehende Strömung ausgezerrt (nach § 135). Bei genügender Entfernung von *I* und *III* fliesst die Strömung nicht mehr direkt von *I* nach *III*, sondern von *I* zur Zimmerwand und von anderen Stellen der Wand nach *III*. Hiermit ist die ganze Strömung in zwei Teile geteilt, aus jedem Stromfaden sind zwei Stromfäden entstanden.

2. Ladung der Platte *II*: Man setzt nun die Senke *III* auf *II*, berührt die untere Seite von *II* einen Augenblick mit dem Finger und hebt *III* ab. Dieser Prozess ist ganz gleich mit dem vorigen. Die Platte *II* ist jetzt eine ebenso starke Quelle geworden als *III* eine Senke ist. Wir haben nun zwei gleich starke Quellen *I* und *II*.

3. Übertragung der Ladung von *II* auf *I*: Man verbindet *II* mit *I* durch den Draht a, setzt *III* auf *I* und berührt die obere Fläche von *III* mit dem Finger.

Die ganze Strömung, welche früher von beiden Platten *I* und *II* ausging, fliesst nun auf dem kürzesten Wege von *I* nach *II* zur Erde. Entfernt man den Draht α, so ist nun *II* ganz unelektrisch, *I* aber eine doppelt so starke Quelle, und *III* eine doppelt so starke Senke wie vorher. Man entfernt den ableitenden Finger von *III* und hebt diese Platte ab.

Nun wiederholt man den Prozess 2, damit ist auch *II* eine doppelt so starke Quelle als anfänglich, dann wiederholt man den Prozess 3, damit ist *I* eine 4 mal so starke Quelle als anfänglich. Dann macht man auch *II* durch Wiederholung des Prozesses 2 zu einer 4 mal so starken Quelle, und so wiederholt man abwechselnd die Prozesse 3 und 2, wodurch immer die Ladung der Platten *I* und *II* verdoppelt wird, bis sie ausserordentlich kräftig ist.

Man kann das Anwachsen der Ladungen von *I* und *II* an den immer grösseren Ausschlägen der mit diesen Platten verbundenen Elektroskopen erkennen und verfolgen.

6. Die Influenzmaschinen.

§ 144. Der im vorigen Abschnitt beschriebene Multiplikationsprozess erfordert nichts anderes als ein maschinenmässiges abwechselndes Nähern der Platte *III* an die Platte *I* und *II*, ein Verbinden der Platten *I* und *II*, sowie Ableiten der Platten *III* und *II* im richtigen Augenblick. Dies alles kann eine einfache Maschine besorgen und eine solche nennt man Influenzmaschine. Die ersten dieser Maschinen wurden von Toepler und

Holtz (1864) gebaut und erregten durch ihre Leistungen grosses Aufsehen.

Die Influenzmaschine besteht aus mindestens zwei runden Glasscheiben, welche dicht neben einander aufgestellt sind und von welchen eine um ihren Mittelpunkt in ihrer Ebene rasch gedreht wird. Auf der einen Glasplatte sind mehrere Stanniolscheibchen aufgeklebt, welche die Rolle der Platten *I* und *II* (Fig. 75) übernehmen. Auf der anderen Glasplatte sind ebenfalls mehrere Stanniolscheibchen aufgeklebt, welche alle wie die Platte *III* (Fig. 75) wirken und während der Drehung der Glasplatte abwechselnd den Stanniolscheibchen der anderen Glasplatte nahe gegenüber zu stehen kommen. Die Verbindung und Ausladung der Stanniolscheibchen besorgen kleine Metalldrähte, welche in Metallbürstchen endigen, die auf den Glasplatten schleifen und die Stanniolscheibchen im richtigen Augenblicke berühren.

Es giebt gegenwärtig eine grosse Anzahl verschiedener Systeme von Influenzmaschinen, von welchen manche auch beträchtlich von dem hier beschriebenen Typus abweichen und 20 bis 60 knapp neben einander stehende Glasscheiben besitzen. Man baut diese Maschinen entweder so, dass sie grosse Strommengen, oder dass sie hohe Spannungen liefern. Fig. 76 und 77 stellen zwei einfache Influenzmaschinen dar. Schon diese liefern elektrische Funken von 30 cm Länge, und vermögen dabei eine Leydnerbatterie mindestens 10 mal so rasch zu laden, wie eine grosse Reibungselektrisiermaschine, obgleich sie viel weniger Arbeit beanspruchen.

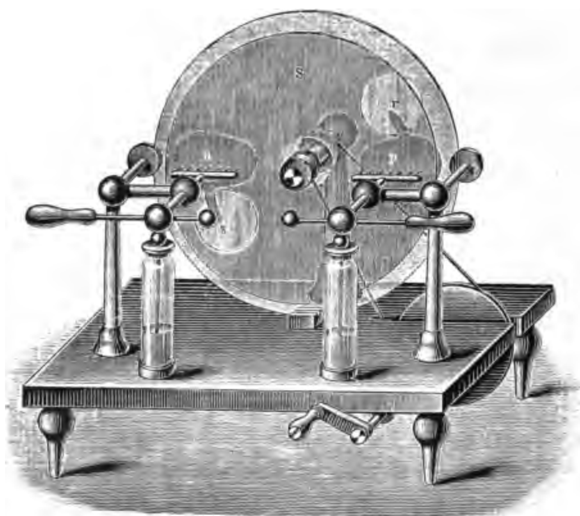


Fig. 76. Influenzmaschine von Toepler.

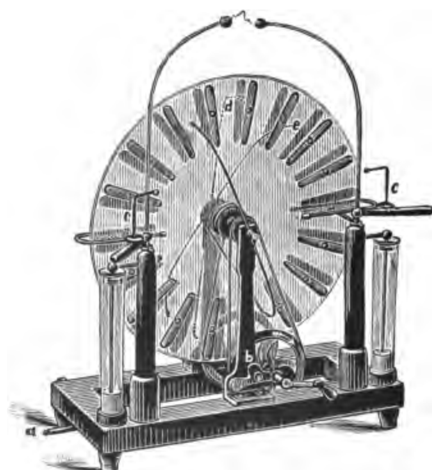


Fig. 77. Influenzmaschine von Wimshurst.

7. Ladung einer Leydnerflasche.

§ 145. Nähert man einen elektrisierten Körper *A* (Fig. 78) der inneren Belegung einer Leydnerflasche *L*, deren äussere Belegung zur Erde abgeleitet ist, so geht die Strömung von *A* zu der inneren Belegung und von dieser senkrecht durch das Glas der Leydnerflasche zu der äusseren Belegung. Ebenso viele Stromfäden als von *A* in die innere Belegung gehen, gehen auch durch das Glas. Da nun die Fläche dieser Belegungen eine grosse ist, so haben die Stromfäden im Glase der Leydnerflasche grossen Querschnitt. Es sind also auch die Niveauschichten sehr dick und da das Glas geringe Dicke hat, so haben nur wenige Niveauschichten darin Platz. Die Spannung der beiden Belegungen einer Leydnerflasche ist im Verhältnis zu der zwischen denselben übergehenden Strommenge immer sehr gering. Verbindet oder berührt man nun *A* mit der inneren Belegung, so wird die zwischen diesen Körpern übergehende Strömung vernichtet, es bleibt nur die Strömung im Glase der Flasche, diese ist nun geladen.

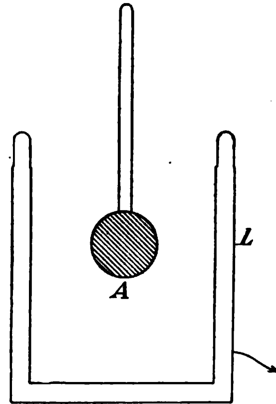


Fig. 78. Ladung einer Leydnerflasche.

Elektrisiert man den Körper *A* von neuem und bringt ihn wieder mit der inneren Belegung der Flasche zur

Berührung, so wird wieder seine ganze Ladung der Flasche übertragen und dieselbe hat nun die doppelte Strommenge, auch die doppelte aber vergleichsweise geringe Spannung. So kann man, wenn auch *A* jedesmal nur sehr wenig geladen ist, durch oftmalige Ladung die Strommenge der Flasche auf sehr hohe Werte bringen. Eine Grenze ist nur dadurch dieser Ladung gesetzt, dass allmählich doch die Spannung auf zu hohe Werte kommen würde und dass dann das Glas der Leydnerflasche von einem elektrischen Funken durchschlagen würde.

Eine Elektrisiermaschine oder Influenzmaschine vermag ebenfalls nur eine bestimmte Spannung zu liefern. Über dieselbe hinaus springen lange Funken über die Glasplatten der Maschine, so dass sich ihre Wirksamkeit nicht weiter steigern lässt. Man kann mit einer solchen Maschine eine Leydnerflasche bis zu dieser hohen Spannung laden. Wenn man bedenkt, wie eng dann die Niveauschichten in dem Glase sind, und dass also auch die Stromfäden sehr eng sein müssen, so erkennt man, wie grosse Strommengen sich in einer Leydnerflasche ansammeln lassen. Wegen der ausserordentlichen Kleinheit der Stromzellen in einer geladenen Flasche enthält dieselbe einen grossen Energiewert (vergl. § 135), welcher für eine grosse Flasche 100 Millionen Erg betragen kann. Entladet man diese Flasche, indem man die beiden Belegungen derselben durch einen Draht verbindet, so springt beim Anlegen des Drahtes zwischen diesem und der Belegung ein Funke, welcher sehr hell ist und laut kracht, denn der ganze grosse Energiewert der elektrischen

Strömung, welche in dem Glase der geladenen Flasche vorhanden war, verwandelt sich in diesem Augenblicke in die Wärme und das Licht des Funkens.

§ 146. Man kann mit Hilfe der Lane'schen Massflasche einer Leydnerflasche die von einer Maschine gelieferte Strommenge in gleiche Partien geteilt zumessen. In Fig. 79 stellt P_1 P_2 die beiden Belegungen einer grossen Leydnerflasche dar, welche einerseits mit der

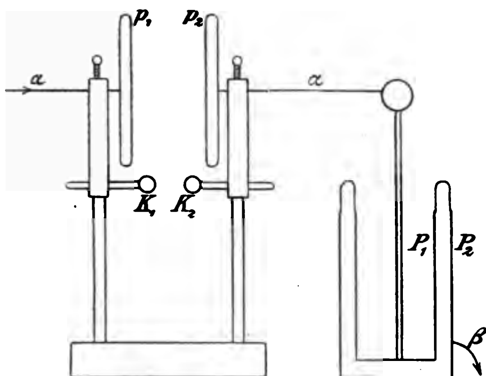


Fig. 79. Lane'sche Massflasche.

Maschine durch den Leitungsdraht α verbunden andererseits durch den Draht β zur Erde abgeleitet sind. Der Zuleitungsdraht ist durch einen kleinen Kondensator p_1 p_2 unterbrochen, welcher die Massflasche genannt wird. Von den beiden Platten desselben führen zwei Drähte zu den kleinen Kugeln k_1 und k_2, zwischen welchen ein Luftraum: die Funkenstrecke gelassen ist.

Nun setzt man die Maschine in Gang. Es fliessen immer mehr Stromfäden durch die beiden Kondensatoren. Hat ihre Zahl bis auf einen gewissen Wert, z. B. bis 100,

zugenommen, so ist auch die Spannung zwischen p_1 und p_2 und also auch zwischen k_1 und k_2 so gross geworden, dass der Funke zwischen k_1 und k_2 springt. Damit ist die Strömung in der Massflasche vernichtet, während in die grosse Leydnerflasche 100 Stromfäden eingeladen sind.

Geht die Maschine weiter, so sind nun bald wieder 100 Stromfäden in der Massflasche, welche weiter durch die grosse Flasche fliessen und die Strommenge derselben vermehren, so dass in dieser gerade 200 Stromfäden vorhanden sind, während der Funke zwischen k_1 und k_2 springt und die Massflasche wieder ausgeladen ist u. s. w.

8. Die Entladung in Gasen.

§ 147. Wir haben öfter erwähnt, dass eine allzu heftige elektrische Strömung in Luft und auch in allen anderen diëlektrischen Medien nicht bestehen kann, sondern plötzlich unter Produktion von Wärme und Licht absinkt und verschwindet. Wir wollen nun die Bedingungen näher beschreiben, unter welchen ein solcher elektrischer Funke oder eine andere Form der leuchtenden Entladung auftritt.

Nähert man zwei entgegengesetzt geladene Metallkugeln (Fig. 69 § 138), so wird das Strombündel, welches zwischen ihnen übergeht, immer kürzer, die Stromfäden drängen sich hierbei in den Zwischenraum zwischen beiden Kugeln zusammen und die Strömung wird dort immer heftiger. Man kann nun diese Kugeln sehr nahe bringen, die Strömung also äusserst heftig machen, ohne

dass sich dieselbe sogleich in einen Funken verwandelt. Das Auftreten eines Funkens braucht einige Zeit, in welcher ein uns noch ganz unbekannter in der Funkenstrecke vor sich gehender Prozess die Funkenbildung vorbereitet.

Dieser Prozess dauert eine ganz bestimmte Zeit, welche, wenn die elektrische Strömung in der Funkenstrecke sehr heftig ist, nur Bruchteile einer Sekunde, wenn die Strömung aber schwächer ist, oft einige Minuten beträgt.

Nähert man die geladenen Kugeln z. B. bis auf 2 mm Distanz, und springt dann der Funke nach $^1/_5$ Sekunde, so kann man bei gleich starker Ladung der Kugeln auch schon bei einer Näherung derselben auf 10 mm Distanz den Funken erhalten, wenn man dem ihn vorbereitenden Prozess fünf Minuten Zeit gewährt.

§ 148. Dieser Vorprozess wird wesentlich beschleunigt, wenn die elektrische Strömung in der Funkenstrecke nicht ruhig, sondern gestört ist, in der Stärke rasch schwankt, wenn rasche elektrische Schwingungen in der Funkenstrecke auftreten oder dieselbe von elektrischen Strahlen oder auch von Licht getroffen wird.

Der die Entladung fördernde Einfluss des Lichtes wurde von Hertz (1887) entdeckt.

§ 149. Die Entladung zwischen zwei Metallkugeln *a* und *b*, deren Ladung durch eine Influenz- oder Elektrisiermaschine bewirkt wird, lässt nicht so deutlich das Wesen der Funkenentladung erkennen, wie die einfache Versuchsanordnung, von welcher wir in § 147 ausgegangen

sind. Denn diese Maschinen liefern keine ruhige Ladung. Sie arbeiten mit Knistern und Sausen, der zahllosen kleinen Fünkchen wegen, welche auf ihren Scheiben überspringen. Jedes dieser Fünkchen bewirkt, wenn auch kleine, so doch ungemein rasche Schwankungen der von der Maschine ausgehenden elektrischen Strömung. Unterdrückt man die gröberen Fünkchen der Maschine durch einen sorgfältigen Bau derselben, so dass sie nicht mehr knistert, sondern nur leise pfeift oder saust, so geht die stärkste Strömung, welche sie zwischen den Metallkugeln

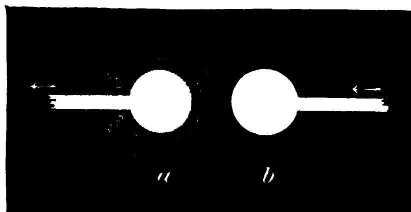


Fig. 80. Glimmentladung.

a und *b* liefert, nicht in Funkenentladung, sondern in Glimmentladung über (Fig. 80). Es bleibt dabei die Luft in der Funkenstrecke ganz dunkel, und nur jene Kugel, welche Senke der Strömung ist, überzieht sich mit einer kornblumenblauen gleichmässig glimmenden Schichte, deren Leuchten so lange andauert als die Maschine wirkt. Diese Schichte rührt von kurzen Kathodenstrahlen[1]) her, die in gewöhnlicher Luft merkwürdigerweise von der positiv geladenen Kugel ausgehen, aber schon nach kurzem Verlauf unter Entwickelung des blauen Lichtes aufgezehrt werden.

---

[1]) Siehe § 308.

§ 150. Schaltet man eine ganz kleine Funkenstrecke *α* in den einen Zuleitungsdraht (Fig. 81), so bewirken die in rascher Folge in dieser Funkenstrecke überspringenden Fünkchen Störungen des vorher ruhigeren Verlaufes der elektrischen Strömung in der Entladungsstrecke *a b*.

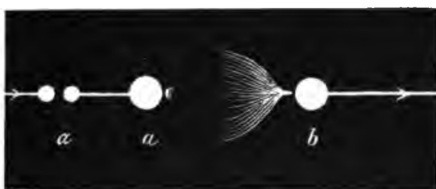


Fig. 81. **Büschelentladung.**

Die Glimmentladung in derselben verwandelt sich infolge dessen in die Büschelentladung, welche schon sehr funkenähnlich ist. Es sitzt dann ein blauviolett leuchtendes baumartig verzweigtes Büschel auf der positiven, ein rotvioletter kurzer Lichtpinsel auf der negativen Kugel



Fig. 82. **Funkenentladung.**

der Entladungsstrecke. Nicht selten, bei stärkeren Schwankungen der Strömung springt ein Funke zwischen *a* und *b* über, welcher wie ein Blitz eine hell weissleuchtende unregelmässige Linie bildet, die für einen Augenblick die Kugeln *a* und *b* verbindet (Fig. 82).

Besonders schön erhält man die Büschelentladung, wenn man als „Elektroden“ der Funkenstrecke statt der Metallkugeln *a* und *b* Metallstäbe verwendet, welche in stumpfe Spitzen ausgehen. Die elektrische Strömung an solchen Spitzen ist heftiger als an den schwächer vortretenden Stellen der Elektroden (vergl. § 120) und darum setzen sich die Büschel in schöner Entwickelung an diese Spitzen an.

9. Die Entladung in verdünnten Gasen.

§ 151. Höchst interessant wird das Aussehen der Entladung, wenn man die Entladungsstrecke unter dem Rezipienten einer Luftpumpe anbringt und die Luft verdünnt.



Fig. 83. Entladung in verdünnter Luft.

Je niedriger der Luftdruck wird desto weniger glänzend sehen die Funken aus, sie sind nicht mehr weiss, sondern hell rotviolett mit einem blauen Punkt an der negativen Elektrode (Kathode) und sind nicht mehr linienförmig, sondern werden immer dicker. Ist die Luft 150 mal

dünner als die gewöhnliche Luft, so haben die Funken in ihr bereits eine Dicke von 1—2 cm und leuchten mattrot.

Bei noch niedrigerem Luftdruck zerlegt sich die Entladung deutlich in zwei Partien. An der positiven Elektrode (Anode) sitzt ein breites karminrotes Büschel, welches aber nie sich in Längsstreifen gliedert, dafür aber oft in regelmässige hellere und dunklere Querschichten zerfällt (Fig. 83). Die Kathode wird von einer dicken kornblumenblauen Schichte umhüllt, welche von Kathodenstrahlen herrührt. (Vergl. § 308, wo die bei noch weiterer Luftverdünnung auftretenden Erscheinungen beschrieben werden.)

VIERTE VORLESUNG.

Elektrische Wirbel. Der Volta'sche Strom.

1. Volta's Entdeckungen.

§ 152. Wenn man die beiden Belegungen einer Leydnerflasche gleichzeitig mit beiden Händen berührt, so sind dieselben durch die Arme leitend verbunden und die Flasche entladet sich durch den menschlichen Körper. Man fühlt dabei ein heftiges Muskelzucken, welches desto empfindlicher ist je stärker die Flasche geladen war. Der erste Physiker, welcher diesen elektrischen Schlag erhielt, versicherte, nicht um die Krone Frankreichs dieses Experiment wiederholen zu wollen.

Selbst die Nerven und Muskeln eines vor Kurzem getödteten Tieres sind hierfür noch empfindlich. Man beobachtete gegen Ende des 18. Jahrhunderts, dass abgehäutete Froschschenkel unter dem Einflusse der elektrischen Entladung zucken. Diese Lebenserscheinung nach dem Tode erweckte die Hoffnung, dass man nun dem Geheimnis des Lebens näher sei. Und doch brachte diese Beobachtung bis heute keine wesentlich tiefere

Kenntnis der Wirksamkeit der Muskel und Nerven. Aber von ihr geht der Aufschwung der Elektrizitätslehre aus.

Das Zucken der Froschschenkel zeigt nämlich schon ungemein niedrig gespannte elektrische Strömungen an und ermöglichte die Entdeckung der chemischen Elektrisierung durch Alessandro Volta.

Taucht man Zink in Wasser und verbindet man andererseits das Wasser wieder mit dem Zink durch einen Froschschenkel, so zuckt derselbe. Volta, welcher der Erfinder des Elektroskopes und des Kondensators ist, kombinierte diese beiden Instrumente zu dem nach ihm benannten Kondensatorelektroskop (§ 136) und wies mit Hilfe desselben nach, dass die Ursache dieses Zuckens der Froschschenkel nicht eine Äusserung der Lebenskraft derselben ist, sondern eine wenn auch ungemein schwache Elektrisierung des mit Wasser in Kontakt stehenden Zinkes.

Trotz der ungemein geringen Spannungen, welche ein solches Volta'sches Element liefert, trotz des äusserst schwachen elektrischen Stromes, welcher von dem Zink durch die Luft zu dem Wasser geht, ist das Volta'sche Element (fälschlich auch Galvani'sches Element genannt), doch eine ungemein wichtige Elektrizitätsquelle, deren Einführung ganz neue Gebiete der Physik und Technik erschlossen hat.

Ein Volta'sches Element bewirkt nämlich eine prinzipiell neue Form der elektrischen Strömung, nicht das Auftreten einer elektrischen Quelle und Sinkstelle, sondern eines elektrischen Wirbels.

2. Differentialelektrometer.

§ 153. Um die äusserst schwachen elektrischen Ströme, welche ein Volta'sches Element durch die Luft sendet, deutlich und bequem nachweisen zu können, verwendet man die Differentialelektrometer.

Die einfachste von Bohnenberger (1810) herrührende Form eines solchen besteht wie das Aluminiumblattelektroskop (§ 128) aus zwei Platten P_1 und P_2 (Fig. 83), welche zusammen einen Kondensator bilden, durch welchen der zu messende schwache elektrische Strom geschickt wird. Genau in der Mitte zwischen beiden Platten hängt völlig von denselben isoliert ein Aluminiumblättchen *a*, welches man dauernd zu einer starken Quelle der elektrischen Strömung macht. Diese Strömung fliesst nach beiden Seiten in die Standplatten P_1 und P_2 und zieht also das Aluminiumblatt mit grossen Kräften nach beiden Seiten. Bei genauer Aufstellung gewinnt aber keine dieser Kräfte die Oberhand, so dass das Blättchen in der Mitte hängen bleibt.

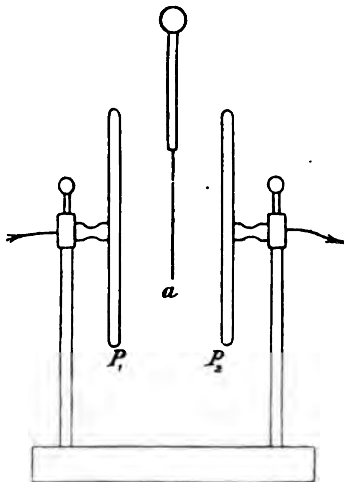


Fig. 84. Differentialelektroskop.

Sendet man nun aber den ganz schwachen zu messen-

den elektrischen Strom von P_1 nach P_2, so wird hierdurch die starke Strömung, welche von a nach P_1 geht,

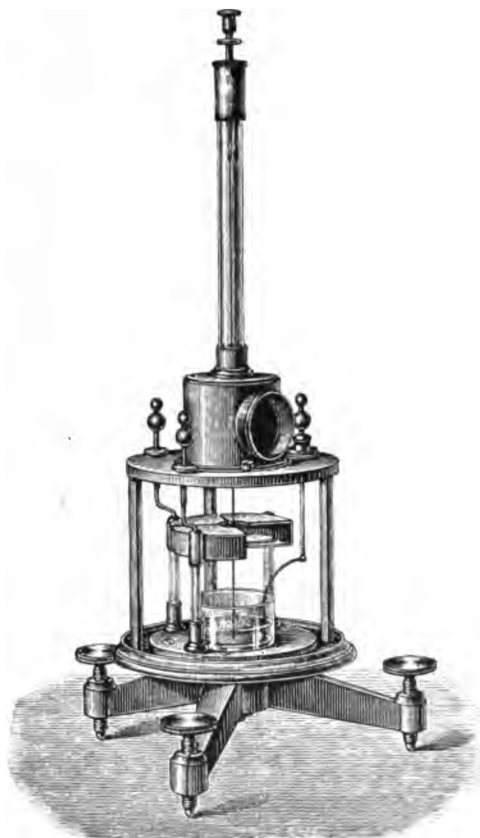


Fig. 85. Quadrantelektrometer.

geschwächt, die starke Strömung, welche von a nach P_2 geht, aber verstärkt und gewinnt die Oberhand, so dass das Blättchen nach P_2 gezogen wird und durch diesen

Ausschlag anzeigt, dass eine schwache Strömung von P_1 nach P_2 fliesst.

Je stärker man das Blättchen *a* anfänglich und dauernd ladet, desto empfindlicher ist das Differentialelektroskop, weil die Kontraktilität der elektrischen Strömung mit dem Quadrate ihrer Stärke zunimmt.

§ 154. Auf dem gleichen Prinzip beruht das Quadrantelektrometer (Fig. 85) von W. Thomson (Lord Kelvin). Nur sind bei diesem die Platten P_1 und P_2 horizontal nebeneinander gestellt und liegt das Blättchen *a* ebenfalls in horizontaler Fläche und ist an einem versilberten Quarzfaden aufgehängt. Dasselbe wird anfänglich und dauernd stark geladen und dreht sich, indem es den Faden tordiert der Platte P_2 zu, wenn man einen auch nur ganz schwachen elektrischen Strom von P_1 nach P_2 sendet.

3. Akkumulatoren, Thermoelemente.

§ 155. Man verwendet gegenwärtig nur selten mehr die Volta'schen Elemente, sondern meistens die Planté-schen Akkumulatoren. Dieselben bestehen aus zwei Bleiplatten, welche in verdünnter Schwefelsäure einander nahe parallel stehen, und von welchen die eine mit einer Schichte des braunen Bleisuperoxydes bedeckt ist, welches jedermann als Bestandteil der Zündholzköpfchen bekannt ist, während die andere Bleiplatte blank ist. Diese sendet eine schwache elektrische Strömung aus, welche durch die Luft zu der Superoxydplatte hinfliesst. Ein Akkumulator liefert eine doppelt so hohe elektrische

Spannung als ein Volta'sches Element. Seine Superoxydschichte kann, wenn sie verbraucht ist, auf bequeme und ökonomische Weise auf elektrischem Wege wieder hergestellt werden, wie wir dies weiter unten genauer beschreiben werden. (Siehe § 174.)

Seltener gebraucht werden die Thermoelemente. Wenn man zwei verschiedene Metalle, am besten Wismut und Antimon, zur Berührung bringt und die Berührungsstelle erwärmt, so wirkt diese Kombination wie ein Volta'sches Element. Das Antimon sendet eine allerdings äusserst schwache elektrische Strömung aus, welche durch die Luft zu dem Wismut hinfliesst. Doch ist die elektrische Spannung, welche ein solches Thermoelement liefern kann, mindestens 15 mal kleiner als die Spannung eines Volta'schen Elementes.

Alle diese Elemente haben das Gemeinsame, dass von zwei in leitender Verbindung stehenden Metallen das eine die elektrische Strömung aussendet, welche durch die Luft zu dem anderen fliesst. Man nennt diese beiden Metalle, von welchen das eine scheinbar eine Quelle, das andere scheinbar eine Senke der elektrischen Strömung ist, die Pole des Elementes oder Akkumulators.

Alle Elemente liefern verschiedene aber bestimmte elektrische Spannungen, wie wir noch in § 160 näher ausführen werden. Die Einheit, in welcher man diese kleinen Spannungen misst, heisst 1 Volt, und ist 300 mal kleiner als die Spannung einer einzigen Stromzelle.

Ein Akkumulator hat die Spannung 2 Volt. Ein

Volta'sches Element hat die Spannung 1,1 Volt, ein Thermoelement bestenfalls die Spannung $^1/_{15}$ Volt.

Eine Influenzmaschine liefert jedoch die Spannung 30 000 Volt, also 100 Zellen in jedem Stromfaden und mehr. Um einen Funken von 1 cm Länge zu erhalten, braucht man mindestens 800 Volt Spannung.

Ein gutes Quadrantelektrometer wird also, wenn man einen Akkumulator neben dasselbe schaltet, einen fast doppelt so grossen Ausschlag geben, als wenn man ein Volta'sches Element nebenschaltet. Giebt es genau den doppelten Ausschlag, als wenn man einen Akkumulator (2 Volt) nebenschaltet, so haben die Platten des Elektrometers eine Spannung von 4 Volt etc.

4. Elektrische Wirbel.
Motorische Kraft der Elemente.

§ 156. Da der elektrische Strom durch leitende Stoffe viel leichter fliesst als durch Luft, wäre es höchst unwahrscheinlich, dass der Zink-Pol eines Volta'schen Elementes oder der Blei-Pol eines Akkumulators wirklich der Anfang oder eine Quelle, der andere Pol das Ende oder eine Senke der elektrischen Strömung ist, dass also dieselbe nur in der Luft, aber nicht durch das leitende Element fliesst. Dieselbe fliesst vielmehr in den Wasser-Pol des Volta'schen Elementes bezw. in den Superoxyd-Pol des Akkumulators, durchfliesst dann das Element und tritt an dem anderen Pole wieder aus. Die Stromfäden haben keinen Anfang und kein Ende, sondern sind sämtlich ringförmig geschlossen. Diese elektrische

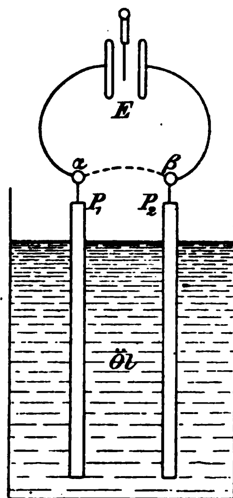
Strömung hat keine Quellen und Senken, sondern bildet einen Wirbel.

Es führt uns also die gleiche Erwägung zu der Annahme, dass ein Volta'sches Element einen elektrischen Wirbel erzeugt (weil es selbst für die elektrische Strömung sehr durchlässig ist), welche Erwägung uns in § 100 zu der Annahme führte, dass ein Magnetstab einen magnetischen Wirbel erzeugt (weil er selbst für die magnetische Strömung sehr durchlässig ist).

§ 157. Helmholtz nahm allerdings an, dass, obgleich ein Volta'sches Element durchwegs aus leitenden Substanzen besteht, doch die Schichte, in welcher das Zink in die Säure übergeht und in welcher sich der chemische Prozess abspielt, nicht einfach von der elektrischen Strömung durchdrungen wird. Es soll vielmehr die eine Seite dieser Reaktionsschichte (gegen das Zink hin) eine echte Quelle der elektrischen Strömung, die andere Seite der Reaktionsschichte eine echte Senke der Strömung sein. Diese würde hiernach nicht in geschlossenen Ringen fliessen, sondern so wie dies Fig. 61 für die elektrische Strömung eines Kondensators darstellt. Die Kondensatorplatten in Fig. 61 stellen dann die beiden Oberflächen der Reaktionsschichte in dem Element dar. Es müsste nur in Fig. 61 die Distanz der Kondensatorplatten viel kleiner gedacht werden, entsprechend der sehr geringen Dicke der Reaktionsschichte. Dieser Helmholtz'schen Annahme wollen wir uns jedoch nicht anschliessen, sondern sogleich zeigen, wie man die elektrische Strömung eines Elementes oder Akkumulators

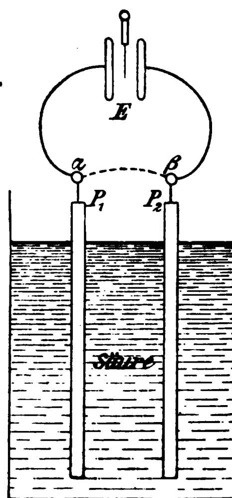
von der elektrischen Strömung eines Kondensators unterscheiden kann.

§ 158. Wir verwenden zur Erzeugung der elektrischen Strömung zwei ganz gleichgeformte Apparate, nämlich einerseits einen Kondensator, welcher aus zwei Metall-



P_1 und P_2 aus beliebigem Metall.

Fig. 86. Ausladung eines Kondensators durch den Schliessungsdraht $\alpha\,\beta$.



P_1 Blei.
P_2 Bleisuperoxyd.

Fig. 87. Stromschluss durch den Draht $\alpha\,\beta$ bei einem Akkumulator.

platten P_1 und P_2 (Fig. 86) besteht, welche in Öl tauchen und andererseits einen Akkumulator, welcher aus zwei Bleiplatten P_1 und P_2 (Fig. 87) besteht, von welchen die eine mit Bleisuperoxyd belegt ist und welche in verdünnte Säure tauchen.

Wir laden den Kondensator (Fig. 86) mittels eines

geriebenen Stabes, bis das neben denselben geschaltete Elektrometer E die Spannung 2 Volt anzeigt. Verbinden wir nun die beiden Platten durch einen feinen Platindraht $\alpha\beta$, so geht die ganze Strömung, welche früher durch den Kondensator und durch das Elektrometer ging nun durch diesen Draht, erwärmt denselben ein wenig, und ist damit aufgebraucht. Der Kondensator ist entladen, das Elektrometer zeigt keinen Ausschlag mehr. In dieser uns bereits wohlbekannten Weise verläuft der Stromschluss durch einen Leitungsdraht $\alpha\beta$, wenn derselbe zwei Platten verbindet, von welchen die eine eine echte Quelle, die andere eine echte Senke der elektrischen Strömung ist, wie dies bei den geladenen Kondensatorplatten Fig. 86 der Fall ist.

§ 159. Anders bei dem Akkumulator Fig. 87. Das neben denselben geschaltete Elektrometer E zeigt dauernd die Spannung 2 Volt an. Nun verbinden wir die beiden Pole P_1 und P_2 des Akkumulators durch den feinen Platindraht $\alpha\beta$. Nun sollte man erwarten, dass durch das Elektrometer keine elektrische Strömung mehr fliessen und der Akkumulator in einem Augenblick entladen sein würde. Dies geschieht aber keineswegs. Sehen Sie vielmehr, welchen merkwürdigen Erfolg der Stromschluss durch den Draht $\alpha\beta$ hat. Statt dass der Akkumulator hierdurch sofort entladen wäre, zeigt vielmehr das Elektrometer dauernd dieselbe Spannung von 2 Volt an wie vor dem Stromschlusse. Obgleich neben dem Elektrometer, dessen Durchlässigkeit ja eine sehr kleine ist, der Strom einen billionenmal durchlässigeren Weg durch den Platin-

draht $\alpha\beta$ findet, bleibt er doch mit seiner anfänglichen Stärke in dem Elektrometer bestehen. Sie können sich also denken, mit welcher Stärke er nun in dem Platindraht fliessen muss. Die jetzt in dem Platindraht vorhandene Strommenge verhält sich zu der in dem Elektrometer vorhandenen Strommenge wie die Durchlässigkeit des Platindrahtes zu der Durchlässigkeit des Elektrometers, ist also billionenmal grösser. Thatsächlich sieht man den so stark durchströmten Platindraht hell und dauernd glühen.

Legt man nun noch einen zweiten Platindraht $\gamma\delta$ neben dem ersten als Stromschluss an, so glühen nun beide Drähte und auch durch das Elektrometer fliesst immer noch der anfänglich in demselben vorhandene Strom.

Statt der Platindrähte kann man mit dem gleichen Erfolge auch eine bezw. mehrere nebeneinander geschaltete Glühlampen verwenden.

§ 160. Ein Akkumulator liefert also nicht eine bestimmte Strommenge, sondern eine bestimmte Spannung. Je besser leitend der Weg ist, welchen man seinem Strome anbietet, desto stärker durchfliesst derselbe diesen Weg, ohne dass deshalb in den nebenliegenden Wegen die Strommenge kleiner würde.

Dies ist eben der Unterschied zwischen Quellströmungen und Wirbelströmungen.

Eine Quellströmung hat immer eine bestimmte Strommenge, während die Spannung der Strömung desto grösser wird, je grösser der Widerstand ihrer Bahn gemacht wird.

Vergl. z. B. die Erhöhung der Spannung zweier Kondensatorplatten, welche man von einander entfernt (§ 135).

Eine Wirbelströmung liefert hingegen immer eine bestimmte motorische Kraft (§ 58) oder Spannung. Die Strommenge derselben ist hingegen desto grösser, je grösser die Leitfähigkeit ihrer Bahn ist. (Vergl. § 62.)

§ 161. Sie begreifen nun die Wichtigkeit der Volta'schen Elemente und Akkumulatoren. Ungeachtet dieselben durch die Luft und durch ein Elektrometer nur äusserst schwache elektrische Strömungen senden können, liefern sie doch Ströme von vergleichsweise ungeheurer Stärke, wenn man denselben einen gutleitenden Draht als Weg zuweist. Der Volta'sche Strom, welcher in dem Schliessungskreise eines Elementes kreist, ist seinem Wesen nach nichts anderes als die durch Luft oder Öl fliessenden elektrischen Ströme, welche wir in den früheren Vorlesungen studiert haben. Aber der Volta'sche Strom hat (trotz seiner geringen Spannung) in guten Leitern eine enorme, ja geradezu unvergleichliche Stärke. Man bemerkt bei diesem heftigen Strome Wirkungen, welche uns bei den Strömen in Luft ganz oder fast ganz entgangen sind: die Wärmewirkung, die chemischen und magnetischen Wirkungen.

Hiergegen zeigt der Volta'sche Strom keine merkliche Kontraktilität, und zwar seiner sehr geringen Spannung und auch der hohen Durchlässigkeit der Stromleiter wegen. (Vergl. § 134.)

5. Neben- und Hintereinanderschaltung von Elementen.

§ 162. Jeder Akkumulator liefert die Spannung 2 Volt gleichgültig wie gross seine Platten sind. Doch ist der Widerstand, welchen der Akkumulator dem Strome bietet, desto kleiner je grösser seine Platten sind, denn desto breiter ist der Weg, welchen der Strom in dem Akkumulator findet. Ferner ist der Widerstand, welchen derselbe dem Strome bietet, desto kleiner je näher die Platten einander stehen. Verglichen mit dem Widerstande, welchen der Strom in einem Kondensator oder Elektrometer findet, ist der eigene (innere) Widerstand eines Akkumulators verschwindend, denn die Säure ist immer noch unvergleichlich durchlässiger für den Strom als die Luft. Verglichen mit den äusserst geringen Widerständen, welche der Strom in metallenen Schliessungsdrähten findet, fällt aber der innere Widerstand des Akkumulators oft sehr ins Gewicht, denn die Säure ist 600000 mal weniger durchlässig als Kupfer, 10000 mal weniger durchlässig als Platin. (Siehe § 165.)

Will man also in einem Schliessungsdrahte von sehr kleinem Widerstande einen kräftigen Strom erzeugen, so schaltet man am besten einige Akkumulatoren nebeneinander, indem man ihre gleichartigen Platten miteinander verbindet. Der Weg des Stromes in der Säure ist dann entsprechend breiter und der innere Widerstand dieser Akkumulatorenbatterie um so viel geringer.

§ 163. Viel öfter kommt man in die Lage in einem

Schliessungskreise von verhältnismässig grossem Widerstande einen kräftigen Strom zu erzeugen und in diesem Falle schaltet man die Akkumulatoren hintereinander, indem man immer den Bleipol des einen mit dem Superoxydpol des nächsten verbindet (Fig. 88).

Zwei hintereinander geschaltete Akkumulatoren geben die doppelte Spannung (4 Volt) als ein einzelner, drei hintereinander geschaltete Akkumulatoren haben 6 Volt

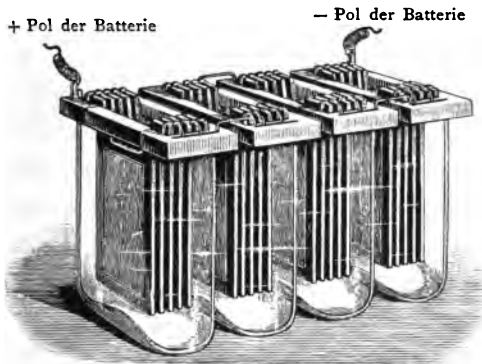


Fig. 88. Hintereinander geschaltete Akkumulatoren.

Spannung, sieben hintereinander geschaltete Akkumulatoren haben 14 Volt Spannung etc.

Die Spannungen hintereinander geschalteter Elemente addieren sich. Man kann so durch grosse Batterien Volta'scher Elemente oder Akkumulatoren beträchtliche Spannungen erzielen. 1000 hintereinander geschaltete Akkumulatoren haben schon 2000 Volt Spannung und geben in einem Schliessungsdrahte von verhältnismässig grossem Widerstande oder in einem Elektrometer einen 1000 mal so starken Strom, wie ein einzelner Akkumulator.

Man hat Batterien von 30000 bis 50000 kleiner Elemente hergestellt, welche keine geringeren Spannungen als eine kleine Influenzmaschine liefern. Zwischen den beiden Polen einer solchen Batterie kann man Funken von mehreren Centimeter Länge erhalten. Kommt es nur auf die Erzeugung hoher Spannungen und nicht auf die Erzeugung beträchtlicher Stromstärken an, so kann der innere Widerstand der Batterie ein sehr grosser sein und man kann dann die Elemente ganz klein machen.


Fig. 89. Zamboni'sche Säule.

Will man weder Funken noch Drahtströme, sondern nur hohe Spannungen in einem Kondensator oder Elektrometer mit Hilfe einer solchen Hochspannungsbatterie erzeugen, so bedient man sich am besten der Papierelemente. Ein solches Element besteht aus einem Stückchen Papier, welches beiderseits mit verschiedenen Metallen belegt ist, von welchen das eine stärker oxydierbar sein muss als das andere. Die Anstriche des unechten Gold- und Silberpapiers sind hierfür recht brauchtbar. Die Masse des Papiers ist immer ein wenig feucht und vertritt die Säure eines Elementes, die beiden Anstriche auf beiden Seiten des Papiers vertreten die Metallpole des Elementes. Ein solches Papierelement hat die Spannung von ungefähr 1 Volt. Legt man 1000 solche Papierstückchen aufeinander, so dass die Goldseite von allen nach unten, die Silberseite nach oben liegt, so liefert diese Batterie (Zamboni'sche Säule) eine

recht konstante Spannung von 1000 Volt. Verbindet man die beiden Enden (Pole) der Säule mit den Platten eines Aluminiumblattelektroskopes (Fig. 64), so zeigt dasselbe einen beträchtlichen Ausschlag. Einen Strom von nennenswerter Stärke kann diese Säule jedoch nicht liefern, man muss sich sogar hüten, ihre Pole durch einen Draht zu verbinden, weil der dann momentan auftretende starke Strom chemische Wirkungen in der Säule hat, welche dieselbe in einem Augenblicke völlig verderben.

6. Stromverzweigung. Widerstands- und Strommessungen.

§ 164. Als Einheit der ausserordentlich kleinen Widerstände, welche Metalldrähte dem Strome entgegensetzen, nimmt man das Ohm an. Es ist dies der Widerstand eines Manganindrahtes von 1 Quadratmillimeter Querschnitt und ca. 1 m (genauer 93 cm) Länge. Das Manganin ist eine Legierung von 70 % Kupfer und 30 % Mangan.

Schliesst man durch diesen Draht vom Widerstande 1 Ohm ein Element von sehr geringem innerem Widerstande, dessen Spannung 1 Volt beträgt, so tritt in diesem Schliessungskreise ein Strom auf, dessen Strommenge man als Einheit der Volta'schen Strommengen annimmt und als 1 Ampère bezeichnet. Schaltet man neben diesen Draht ein Elektrometer, dessen beide Platten also mit den Polen des Elementes verbunden werden, so zeigt dasselbe eine Spannung von 1 Volt an.

Schliesst man einen Akkumulator durch diesen Draht vom Widerstande 1 Ohm und durch ein nebengeschaltetes

Elektrometer, so erhält man in diesen beiden dem Strome gebotenen Wegen nun den doppelten Strom. In dem Drahte fliesst ein Strom von 2 Ampère, das Elektrometer zeigt eine Spannung von 2 Volt an.

Ein Elektrometer P_1 P_2 Fig. 90, neben welches ein Draht a_1 a_2 von 1 Ohm Widerstand geschaltet ist, kann

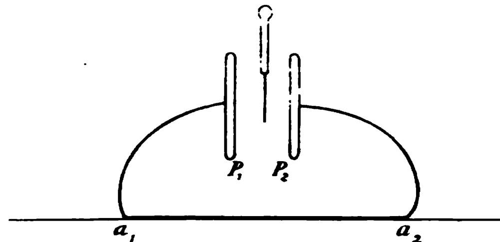


Fig. 90. Elektrometer als Strommesser.

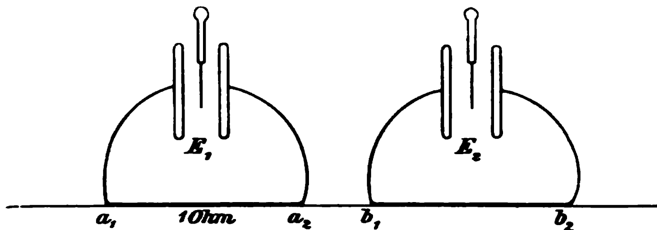


Fig. 91. Elektrometer als Widerstandsmesser.

uns also als Strommesser dienen. Schaltet man dasselbe in irgend einen Stromkreis und zeigt dasselbe eine Spannung von 1, 2, 3, 4 Volt an, so fliesst in dem Stromkreise ein Strom von 1, 2, 3, 4 Ampère.

§ 165. Nun können wir den Widerstand irgend eines anderen Drahtes leicht bestimmen. Wir schalten in irgend einen Stromkreis hintereinander einen Draht a_1 a_2 von 1 Ohm Widerstand und den Draht b_1 b_2, dessen Wider-

stand wir bestimmen wollen. Neben diese beiden Drähte werden zwei Elektrometer E_1 und E_2 geschaltet. Zeigen beide dieselbe Spannung an, so sind die Widerstände der Drähte $a_1\,a_2$ und $b_1\,b_2$ einander gleich. Zeigt jedoch E_2 die 2, 3, 4 fache Spannung an, so hat der Draht $b_1\,b_2$ den Widerstand 2, 3, 4 Ohm.

Es zeigt sich, dass Drähte oder Säulen von 1 m Länge und 1 mm² Querschnitt aus verschiedenem Material folgende Widerstände haben:

Material des Drahtes	Widerstand in Ohm
Silber	0,017
Kupfer	0,018
Platin	0,14
Blei	0,22
Neusilber . . .	0,35
Quecksilber . . .	0,95
Kohle	500,—
Schwefelsäure . .	14000,—
Kupfervitriollösung	240000,—

Salzlösungen, Säuren und Laugen haben cet. par. desto grösseren Widerstand, je stärker sie verdünnt sind.

Von allen Metallen hat also Kupfer und Silber die grösste Leitfähigkeit. Ein Kupferdraht von 1 mm² Querschnitt hat erst bei einer Länge von 45 m den Widerstand 1 Ohm. Ein Kohlenfaden von 1 mm² Querschnitt hat aber schon bei 2 mm Länge den Widerstand 1 Ohm.

Der Widerstand eines Stromleiters ist desto kleiner, je grösser sein Querschnitt ist. Ein Stück von 1 m Länge

eines Manganindrahtes hat 1 Ohm Widerstand, wenn der Querschnitt des Drahtes 1 mm² beträgt, hingegen $^1/_2$ Ohm Widerstand, wenn der Draht 2 mm² Querschnitt und 10 Ohm Widerstand, wenn der Draht $^1/_{10}$ mm² Querschnitt hat.

Eine Säule von 1 mm² Querschnitt und 1 m Länge von Schwefelsäure hat 14 000 Ohm Widerstand. Eine Säule desselben Stoffes von $^1/_{10}$ m Länge und 100 mm² Querschnitt hat jedoch nur 14 Ohm Widerstand.

Ein Kohlenfaden einer Glühlampe von 10 cm Länge und $^1/_{10}$ mm² Querschnitt hat 500 Ohm Widerstand.

Schalten wir z. B. in denselben Stromkreis einen Manganindraht $a_1 a_2$ Fig. 92 von 1 Ohm Widerstand,

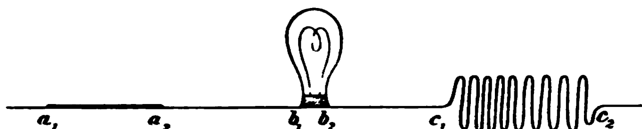


Fig. 92. **Hintereinander geschaltete Widerstände.**

dann obige Glühlampe $b_1 b_2$ von 500 Ohm Widerstand und endlich einen Kupferdraht $c_1 c_2$ von 45 m Länge und 2 mm² Querschnitt und bestimmen wir die Spannung der Enden dieser drei Widerstände mit Hilfe eines Elektrometers, so zeigt sich an den Enden des Manganindrahtes die Spannung 0,2 Volt, wenn die Strommenge 0,2 Ampère beträgt, an den Enden der Glühlampe die Spannung 100 Volt und an den Enden des 45 m langen Kupferdrahtes die Spannung 0,1 Volt.

§ 106. Teilt man einen Stromdraht $a\,e$ Fig. 91 in zwei Zweige $b\,c_1\,d$ und $b\,c_2\,d$, so verteilt sich die in $a\,b$

heranfliessende Strommenge auf die beiden Zweige im Verhältnis der Leitfähigkeiten derselben. Hat der Zweig $b c_1 d$ einen doppelt so grossen Widerstand wie der Zweig $b c_2 d$, so fliesst ein Drittel der ganzen Strommenge durch $b c_1 d$, während zwei Drittel derselben durch $b c_2 d$ fliessen.

Schaltet man 4 Strommesser (siehe § 164) in die vier Drähte $a b$, $b c_1 d$, $b c_2 d$ und $d e$ und zeigt der Strommesser in $a b$ z. B. 3 Ampère an, so zeigt der Strommesser in $d e$ dieselbe Strommenge an, der Strommesser

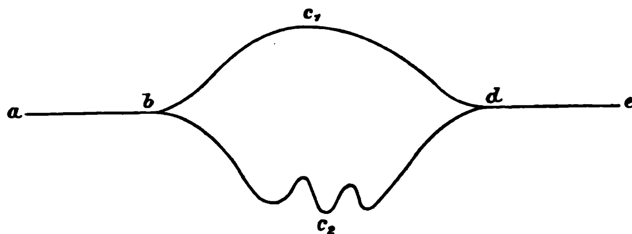


Fig. 93. Nebeneinander geschaltete Widerstände.

in $b c_1 d$ zeigt 1 Ampère, der Strommesser in $b c_2 d$ zeigt 2 Ampère an.

Alle diese Strommessungen und Widerstandsmessungen gelingen mit der denkbar grössten Exaktheit.

§ 167. Der Widerstand eines Manganindrahtes ändert sich nicht mit der Temperatur des Drahtes. Der Widerstand der Drähte aus reinem Metall steigt jedoch mit der Temperatur, so dass er bei 300° Celsius doppelt so gross ist als bei gewöhnlicher Temperatur. Der Widerstand eines Kohlenfadens, so wie auch der Widerstand der wässerigen Lösungen von Säuren, Laugen und Salzen sinkt im Gegenteile bei Erwärmung dieser Leiter.

7. Die Wärmewirkung des Volta'schen Stromes.

§ 168. Wir haben schon in § 159 erfahren, dass die heftigen elektrischen Ströme, welche man mittels Akkumulatoren und Volta'scher Elemente in Drähten erzeugen kann, eine beträchtliche Erwärmung der Drähte bewirken und dieselben unter günstigen Umständen bis zum Glühen und Abschmelzen erhitzen können.

Ein Drahtstück aus beliebigem Material, durch welches ein Volta'scher Strom von 1 Ampère Strommenge fliesst und an dessen Enden eine Spannung von 1 Volt herrscht, produziert in je 70 Minuten so viel Wärme, dass man damit 1 Liter Wasser um 1^0 Celsius erwärmen kann. Diese Wärmeproduktion steigt sowohl mit der Strommenge als mit der Spannung. (Joule's Gesetz.) Ein Drahtstück, dessen Enden die Spannung 3 Volt haben und welches von 5 Ampère durchflossen wird, produziert 15 mal mehr Wärme, dasselbe kann in 70 Minuten einen Liter Wasser um 15^0 Celsius erwärmen.

Wir verstehen nun, warum in einer elektrischen Beleuchtungsanlage nur die Kohlenfäden der Glühlampen glühen, die kupfernen Zuleitungsdrähte aber fast kalt bleiben, obgleich doch dieselbe Strommenge auch durch diese fliesst. Der Kohlenfaden der Glühlampen hat nämlich einen sehr grossen Widerstand, so dass die Spannung an den Enden desselben gross ist (siehe § 165), während die gutleitenden Kupferdrähte geringe Spannungen haben. Es fliesse ein Strom von 0,2 Am-

père durch die Glühlampe. Wenn die kupfernen Zuleitungen selbst 1 Ohm Widerstand haben, so erzeugen sie also in 70 Minuten nicht mehr Wärme als nötig ist um 1 Liter Wasser um 0,2° Celsius zu erwärmen. Derselbe Strom von 0,2 Ampère fliesst auch durch den Kohlenfaden, da dieser aber einen Widerstand von 500 Ohm haben kann, so haben seine Enden 100 Volt Spannung und er produziert in 70 Minuten so viel



Fig. 94. Elektrisches Bogenlicht.

Wärme als nötig ist einen Liter Wasser um $0{,}2 \times 100 = 20^0$ Celsius zu erwärmen. Diese Wärme in dem dünnen Kohlenfaden konzentriert, reicht hin, denselben im Glühen zu erhalten.

§ 169. Zur Herstellung eines elektrischen Bogenlichtes braucht man mehr als 20 hintereinander geschaltete Akkumulatoren. Man führt von den Polen dieser Batterie Zuleitungsdrähte zu den zwei Kohlenstiften der Lampe, bringt diese zur Berührung und zieht sie dann auseinander. Zwischen den Kohlenspitzen tritt nun eine

Art dauernder elektrischer Funke: der elektrische Lichtbogen (Fig. 94) auf. Die beiden Kohlenspitzen haben dann eine Spannung von 45 Volt, während ein Strom von 10 Ampère durch den Lichtbogen fliesst. Die Wärme, welche derselbe in 70 Minuten produziert, reicht hin um 450 Liter Wasser um 1° Celsius zu erwärmen. Diese bedeutenden Wärmemengen, welche in dem kleinen Lichtbogen konzentriert auftreten, geben demselben eine so hohe Temperatur, dass in demselben Platin und Gold schmelzen.

FÜNFTE VORLESUNG.

Die Elektrolyse. Der Peltiereffekt.

1. Einleitung.

§ 170. Das wichtigste Merkmal einer wahren Strömung ist, dass dieselbe einen Stoff von einem Orte zu einem anderen transportiert. Die Wasserströmung transportiert das Wasser, die Luftströmung transportiert die Luft.

Die wissenschaftliche Forschung hat eine ganze Reihe vorher unbekannter strömungsartiger Erscheinungen aufgedeckt. Durch diese Erweiterung unseres Gesichtskreises erweiterten sich auch die Begriffe Strömung und Stoff.

Man nennt jede Eigenschaft oder Gruppe von Eigenschaften, welche sich transportieren lässt, schon einen Stoff, wenn diese Eigenschaften auch nicht greifbar und nicht wägbar sein sollten. Und man nennt jeden Vorgang, welcher den Transport einer Eigenschaft bewirkt, schon eine Strömung, wenn dieser Vorgang auch keine sichtbare Bewegung wägbarer Stoffe bewirkt.

Als Beispiel diene die Strömung der Wärme. Wenn man einen heissen und einen kalten Körper durch einen Kupferdraht verbindet, so wird ersterer kälter, der andere um soviel wärmer. Es ist also die Wärme von dem ersten auf den zweiten oder die Kälte von dem zweiten auf den ersten Körper übergeströmt.

§ 171. Aber auch bei dieser Erweiterung der Begriffe Stoff und Strömung hat man noch kein Recht, die elektrische Strömung in Luft als eine wahre Strömung zu betrachten. Wenn hierbei die elektrischen Quellen fortwährend leichter, die elektrischen Senken immer schwerer würden, dann wäre die elektrische Strömung eine wahre Strömung eines wägbaren Stoffes. Wenn hierbei die elektrischen Quellen immer kälter, die elektrischen Senken immer wärmer würden, dann wäre die elektrische Strömung eine Strömung der Wärme. Wenn hierbei die elektrischen Quellen immer heller in der Farbe, die elektrischen Senken immer schwärzer würden, dann wäre die elektrische Strömung als Strömung eines schwärzenden Stoffes aufzufassen.

Aber nichts dergleichen ist zu beobachten. Vielleicht liegt es aber nur in der grossen Schwäche der elektrischen Strömung in Luft und an der Hinfälligkeit, der kurzen Dauer dieser Strömung, dass man ihre Transportwirkungen nicht bemerkt.

Nun haben wir aber in dem Volta'schen Strome in gut leitenden Schliessungskreisen eine ungemein heftige und andauernde elektrische Strömung kennen gelernt. Diese zeigt eine ganze Reihe neuer Wirkungen, welche

man bei der schwächeren elektrischen Strömung in Luft nicht erkennen kann, und darunter sind deutliche Transportwirkungen. Der Volta'sche Strom transportiert die Wärme und die Brennbarkeit.

Er fliesst allerdings stets in geschlossenen Ringen ohne Quellen und Sinkstellen zu haben, an welchen man Anhäufungen der transportierten Eigenschaften beobachten könnte. Man kann also nur solche Transportwirkungen des Volta'schen Stromes erkennen, welche bei gleicher Stärke desselben in Leitern aus verschiedenem Material, aus welchen man den Stromkreis zusammensetzt, verschieden ausgiebig sind. An den Stellen, wo diese verschiedenen Leitern zusammenstossen, kann man dann Anhäufungen oder Verluste der transportierten Eigenschaften beobachten.

2. Der Peltiereffekt.

§ 172. Schaltet man in einen kupfernen vom Strome durchflossenen Leitungsdraht *a b* Fig. 95 ein Stück Eisen-



Fig. 95. Ladung eines Thermoelementes.

draht e_1 e_2 ein, so zeigt sich an der Lötstelle e_1, in welcher der Strom aus dem Kupfer in das Eisen tritt, eine fortschreitende Abkühlung, an der anderen Lötstelle e_2, in welcher der Strom aus dem Eisen in Kupfer tritt, eine fortschreitende Erwärmung. Bei kräftigeren Thermoelementen, z. B. bei Kombination von Wismut und Antimondrähten, ist diese Peltier'sche Erscheinung noch ausgiebiger.

Der Volta'sche Strom transportiert also die Wärme, und zwar ist diese Transportwirkung bei gleicher Stromstärke in Eisen ausgiebiger als in Kupfer. Deshalb transportiert der Strom weniger Wärme von *a* im Kupferdraht gegen die Lötstelle e_1, als er im Eisen von dieser Lötstelle wegführt und dieselbe muss sich also abkühlen. Andererseits transportiert er mehr Wärme im Eisendraht gegen die andere Lötstelle e_2, als er in dem Kupfer von dieser Lötstelle gegen *b* wegführt und daher muss die zweite Lötstelle immerzu wärmer werden.

Man kann mit dem gleichen Rechte das Peltier'sche Phänomen dahin deuten, dass der Volta'sche Strom nicht die Wärme, sondern die Kälte transportiert, dass aber diese Wirkung im Kupfer ausgiebiger ist als im Eisen.

§ 173. Ist die eine Lötstelle eines Thermoelementes warm, die andere kalt, so kann dieses Element nach § 155 selbst einen Strom liefern. Dieser Strom kühlt dann die warme Lötstelle ab und erwärmt die kalte Lötstelle.

Sendet man also durch das Thermoelement Fig. 95 längere Zeit einen kräftigen Volta'schen Strom von *a* nach *b*, so wird die Lötstelle e_1 abgekühlt, die Lötstelle e_2 erwärmt, und damit wird das Element selbst wirkungsfähig oder „geladen". Es vermag jetzt, wenn man es durch einen kupfernen Kreis schliesst, einen Strom zu liefern, welcher von *b* nach *a* geht, also die entgegengesetzte Richtung wie der Ladestrom hat, und viel schwächer ist. Dieser Entladestrom gleicht die Temperaturdifferenz der

Lötstellen wieder aus, so dass dann das Element wieder entladen ist.

3. Laden und Entladen der Akkumulatoren.

§ 174. Viel interessanter noch als der Peltiereffekt sind die chemischen Wirkungen des Volta'schen Stromes, weil diese mit einem unzweifelhaften Transport eines wägbaren Stoffes verbunden sind.

Betrachten wir zunächst die Ladung eines Akkumulators mittels eines kräftigen Volta'schen Stromes. Ein ungeladener Akkumulator besteht aus zwei Bleiplatten e_1 e_2

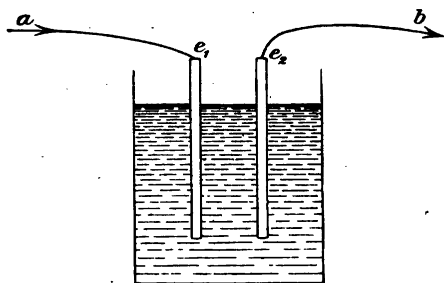


Fig. 96. Ladung eines Akkumulators.

Fig. 96, welche beide mit rotem Bleioxyd bedeckt sind. Sendet man nun einen Volta'schen Strom durch den Akkumulator, so verwandelt sich an der Eintrittsfläche des Stromes das Bleioxyd allmählich in blankes Blei, während gleichzeitig an der Austrittsfläche das rote Bleioxyd sich in braunes Bleisuperoxyd verwandelt. Der Strom hat Sauerstoff von der Eintrittsfläche zur Austrittsfläche transportiert. Diese Transportwirkung ist desto stärker, je stärker der Strom ist, und desto ausgiebiger,

je längere Zeit derselbe durch den Akkumulator fliesst. Hat sich das Bleioxyd an der Eintrittsplatte ganz in Blei, an der Austrittsplatte ganz in Bleisuperoxyd verwandelt, so ist nun der Akkumulator völlig geladen.

§ 175. Er ist nun selbst befähigt einen Strom zu treiben. Dieser Strom (Entladestrom) hat aber die entgegengesetzte Richtung, welche der Ladestrom hatte, und transportiert den Sauerstoff ebenso stark wie der Ladestrom. Er fliesst im Akkumulator von der Bleisuperoxydplatte zur Bleiplatte, erstere verwandelt sich also wieder in Bleioxyd, während der zu der Bleiplatte geführte Sauerstoff diese ebenfalls zu Bleioxyd oxydiert. Während also der Akkumulator den Strom treibt, entladet er sich wieder. Wurde er durch einen Strom von 3 Ampère durch 10 Stunden geladen, so kann er als Entladestrom wieder einen Strom von 3 Ampère während nahezu 10 Stunden liefern, ehe er entladen ist, oder er kann auch, wenn man ihn z. B. durch einen zweimal kleineren Widerstand schliesst, einen Strom von 6 Ampère während 5 Stunden liefern.

4. Die Elektrolyse.

§ 176. Ganz dieselbe chemische Transportwirkung hat der Volta'sche Strom nicht nur in den Akkumulatoren, sondern auch in den Volta'schen Elementen, und überhaupt in allen leitenden, nicht metallischen Flüssigkeiten, welchen man ihn mittels Metallelektroden zuführt.

Führt man den Strom mittels einer Platinplatte e_1 (Fig. 97) in angesäuertes Wasser und aus demselben mittels einer zweiten Platinelektrode e_2 wieder heraus, so

transportiert er den Sauerstoff von der Eintrittsfläche e_1 zur Austrittsfläche e_2. An letzterer tritt das freie Sauerstoffgas in Blasen auf, an ersterer wird der Sauerstoff dem Wasser entzogen und es entsteht hierdurch das brennbare Wasserstoffgas, welches ebenfalls in Blasen austritt.

Führt man den Strom durch eine wässerige Salzsäurelösung, so führt er ebenfalls Sauerstoff von der Kathode e_1 weg, und es tritt unmittelbar an dieser Elektrode das Reduktionsprodukt des Wassers: freies Wasserstoffgas auf. Der Strom führt den Sauerstoff zu der Anode e_2, an welcher nun das gelbgrüne Chlorgas auftritt, welches immer entsteht, wenn man Salzsäure oxydiert, der heftigen Wirkung von Sauerstoff aussetzt.



Fig. 97.
Elektrolytische Zelle
(e_1 Kathode, e_2 Anode).

Führt man den Strom durch eine wässerige Lösung von Natronlauge, so entsteht an der Eintrittsfläche das Reduktionsprodukt derselben, nämlich blankes Natriummetall, welches sich an der Kathodenplatte e_1 absetzt. Dasselbe ist allerdings nicht lange beständig. Es löst sich in dem Wasser wieder zu Natronlauge auf, wobei Wasserstoff frei wird. Zu der Anode e_2 führt der Strom den Sauerstoff hin, welcher dort in Form von Blasen entweicht.

§ 177. Mischt man eine Salzsäure- und eine Natronlösung, so erhält man eine Lösung von salzsaurem Natron (Natriumchlorid, Kochsalz). Sendet man durch diese den Strom, so treten die beiden oben beschriebenen Reaktionen gleichzeitig auf. An der Kathode scheidet sich das Reduktionsprodukt des Natrons: blankes Natrium ab, an der Anode tritt das Oxydationsprodukt der Salzsäure, nämlich Chlor, auf.

Da nun Natrium und Chlor sich ebenfalls zu Kochsalz verbinden, so kann man die Wirkung des Stromes auch als eine Zersetzung des Salzes in zwei Bestandteile auffassen. Diese Bestandteile (Jonen) sind jedoch nicht die natürlichen Komponenten, aus welchen das Salz besteht (Basis und Säure, Natron und Salzsäure), sondern sie sind die reduzierte Basis und die oxydierte Säure.

Führt man den Strom durch eine wässerige Lösung von schwefelsaurem Kupferoxyd (Kupfervitriol), so scheidet sich an der Kathode das Reduktionsprodukt des Kupferoxydes, das brennbare Kupfer ab. An der Anode scheidet sich oxydierte Schwefelsäure ab, welche jedoch nicht beständig ist, sondern Sauerstoff abscheidet, während Schwefelsäure an der Anode in Lösung bleibt. Besteht die Anodenplatte selbst aus einem oxydierbaren Metalle (z. B. Zink), so wird sie verbrannt (zu Zinkoxyd), welches sich in der Säure löst. Besteht die Anodenplatte aus Kupfer, so wird sie zu Kupferoxyd verbrannt, welches sich in der Säure zu Kupfervitriol auflöst.

Dieser Fall der Elektrolyse gewinnt sonach den Anschein, als würde der Strom Kupfer von der Anode

zur Kathode transportieren, die Lösung aber unzersetzt lassen.

§ 178. Dieselbe Wirkung wie in der wässerigen Lösung eines Salzes hat der Strom auch in geschmolzenen wasserfreien Salzen. Führt man den Strom durch geschmolzenes Kochsalz, so tritt an der Kathode das Reduktionsprodukt des Natrons: Natriummetall, und an der Anode das Oxydationsprodukt der Salzsäure: Chlor auf.

§ 179. Ausser den elektrolytischen Wirkungen, welche sich auf einen Transport des Sauerstoffes zurückführen lassen, hat der Strom in wässerigen Lösungen noch andere allerdings unbedeutende Transportwirkungen. Er führt nämlich gelöste Laugen mit sich, so dass sich die Konzentration der Lauge in der Nähe der Kathode verkleinert, in der Nähe der Anode vergrössert. Die Säuren werden in entgegengesetzter Richtung von dem Strome transportiert. Bei Salzen ist diese Transportwirkung sehr unbedeutend. Das nähere Studium dieser interessanten, von Hittorf entdeckten Überführung der elektrolytischen Stoffe durch den Strom bildet einen wichtigen Zweig der modernen physikalischen Chemie.

5. Faraday's Gesetz der Elektrolyse. Das Ohm'sche Gesetz.

§ 180. Ein Strom, dessen Stromstärke 1 Ampère beträgt, führt in jeder Minute 5 Milligramm Sauerstoff von der Kathode zur Anode, gleichgültig welche Natur die elektrolytische Lösung hat.

Sendet man denselben Strom durch zwei hinter-

einander geschaltete elektrolytische Zellen, so finden also in beiden äquivalente elektrolytische Prozesse statt. (Faraday.)

Die erste Zelle (e_1 e_2 Fig. 98) sei z. B. mit einer Kochsalzlösung, die zweite Zelle E_1 E_2 mit einer Lösung von Kupferchlorid gefüllt. An beiden Anoden (e_2 und E_2) scheiden sich dann gleichzeitig gleiche Chlormengen ab.

Ist die erste Zelle mit Kochsalzlösung, die zweite Zelle mit Kupfervitriollösung gefüllt, so scheidet sich an

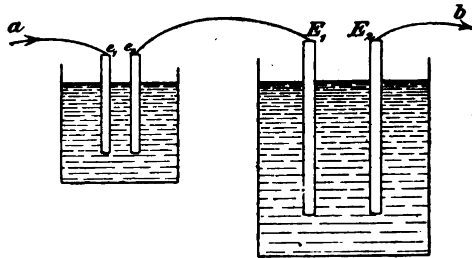


Fig. 98. Hintereinander geschaltete elektrolytische Zellen.

e_1 soviel Natrium ab, als gerade hinreicht mit der an E_2 auftretenden Schwefelsäure normales schwefelsaures Natron zu bilden, und es scheidet sich an E_1 so viel Kupfer ab, als gerade hinreicht, mit dem an e_2 auftretenden Chlor normales Kupferchlorid zu bilden. Mit anderen Worten: die in hintereinander geschalteten elektrolytischen Zellen abgeschiedenen Jonen sind chemisch äquivalent. Die Ursache hiervon ist, dass sie dem Auftreten gleicher Sauerstoffmengen an beiden Anoden, und dem Verschwinden gleicher Sauerstoffmengen an beiden Kathoden ihren Ursprung verdanken.

§ 181. Ein Strom, dessen Strommenge 2, 3, 4 Ampère beträgt, transportiert in jeder elektrolytischen Lösung pro Minute 2, 3, 4 mal so viel Sauerstoff als ein Strom von 1 Ampère, also bezw. 10, 15, 20 Milligramm.

Man hat also in der chemischen Wirkung des Stromes ein genaues und direktes Mass der Strommenge.

Man verwendet zur Strommessung sehr oft das Knallgasvoltameter. Dasselbe besteht aus einem elektrolytischen Gefäss (Fig. 99), in welches 2 Platinelektroden e_1 e_2 ragen. Über dieselben ist eine mit Volumsteilung versehene Glasglocke gestülpt. Das ganze Gefäss und die Glocke werden mit angesäuertem Wasser gefüllt. Es entwickeln sich an der Anode pro Ampèreminute 5 Milligramm, das ist 3,4 ccm Sauerstoff. An der Kathode entwickelt sich die äquivalente Menge, das ist das doppelte Volum (6,8 ccm) Wasserstoff. Im Ganzen treten also pro Ampère und Minute 10,2 ccm Knallgas auf.



Fig. 99.
Knallgasvoltameter.

§ 182. Da wir somit ein direktes Strommass besitzen, so können wir nun umgekehrt, wie wir dies in § 164 gethan haben, Spannungsmessungen auf Strommessungen zurückführen.

Wir definieren 1 Volt als jene Spannung, welche die Enden eines Drahtstückes von 1 Ohm Widerstand haben,

wenn durch diesen Draht ein Strom von 1 Ampère (elektrochemisch gemessen) fliesst.

Wir können so mit Hilfe eines Knallgasvoltameters ein Elektrometer graduieren. Wir schalten in einen Stromkreis ein Voltameter *V* (Fig. 100) ein und führen von den Punkten *a* und *b* des Stromdrahtes zwei Leitungen zu den Platten des Elektrometers *E*. Der Widerstand des Drahtstückes *a b* muss bekannt sein. Derselbe betrage z. B. 1 Ohm. Wenn nun im Voltameter pro Minute 10,2 ccm Knallgas entwickelt werden, so hat der Strom

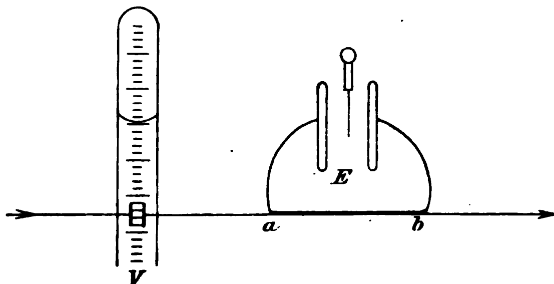


Fig. 100. Graduierung eines Elektrometers.

die Stärke 1 Ampère. Dann müssen die Punkte *a* und *b* die Spannung 1 Volt haben und der Ausschlag, welchen das Elektrometer nun zeigt, entspricht der Spannung 1 Volt. Verstärken wir den Strom bis auf 2 Ampère, so erhalten wir jenen Ausschlag des Elektrometers, welcher 2 Volt entspricht u. s. f.

§ 183. Verfügen wir über ein gut graduiertes Elektrometer, ein Knallgasvoltameter und Drähte von bekanntem Widerstand, so können wir uns überzeugen, dass in jedem von einem Strom durchflossenen Drahtstücke die

Spannung E der Enden desselben (in Volt elektrometrisch gemessen) gleich ist der durch dasselbe fliessenden Strommenge J (in Ampère elektrochemisch gemessen) multipliziert mit dem Widerstande W desselben (in Ohm gemessen). Dies ist das von Ohm (1826) entdeckte Gesetz.

$$E = J \cdot W.$$

Wir können hiernach z. B. berechnen, wie gross die Strommenge ist, welche in dem Schliessungskreise eines Akkumulators auftritt, wenn der Schliessungsdraht den Widerstand $W = 10$ Ohm hat. Die elektromotorische Kraft oder Spannung des Akkumulators beträgt 2 Volt. Die Strommenge $J = \frac{E}{W}$ wird also gleich $^1/_5$ Ampère sein.

6. Der chemische Umsatz in den Elementen und die Wärmewirkung des Stromes.

§ 184. Wir haben in den elektrolytischen Vorgängen chemische Prozesse eigener Art, gerichtete (durch die Stromrichtung beeinflusste) chemische Prozesse kennen gelernt. Dieselben sind im wesentlichen Reduktions- und Oxydationsprozesse. Es ist nicht unmöglich, dass alle Reduktions- und Oxydationsprozesse keine gewöhnlichen chemischen Vorgänge, sondern in wesentlichen gerichtete elektrochemische Prozesse sind.

Betrachten wir z. B. die Lösung von Zink in Säure, so scheint dieselbe ein gewöhnlicher chemischer Verbindungsvorgang zu sein, bei welchem das Zink den Wasserstoff der Säure verdrängt und ausserdem die chemische Wärmeproduktion bemerkbar wird. In Wirklichkeit

geht aber dieser Prozess unter Mitwirkung Volta'scher Ströme vor sich, welche zwischen den verschiedenen Punkten der gewöhnlich ungleichmässigen und korrodierten Oberfläche des Zinkstückes verlaufen. Taucht man ein glattes gleichmässiges Stück Zink in Säure, so wird es überhaupt nicht angegriffen. Ein einfacher chemischer Prozess zwischen Zink und Säure ist also nicht möglich. Man muss noch eine Platinplatte in die Säure tauchen und nun dieses Volta'sche Element durch einen Leitungsdraht schliessen, durch welchen man das Platin mit dem Zink verbindet. Nun tritt ein Volta'scher Strom auf. Dieser transportiert Sauerstoff vom Platin zum Zink durch die Säure und vermag am Platin kräftige Reduktionen am Zink kräftige Oxydationen zu bewirken.

Es tritt am Platin das Reduktionsprodukt des Wassers: Wasserstoffgas auf. Das Zink wird oxydiert und das Zinkoxyd löst sich in der Säure. Dieser Oxydationsprozess geht aber ohne Wärmeproduktion vor sich. Die entsprechende Wärmeentwickelung findet vielmehr in dem Schliessungsdrahte statt, besonders an den Stellen grössten Widerstandes desselben, z. B. in einer eingeschalteten Glühlampe.

Nun erst kennen wir den Prozess der Lösung von Zink in Säure gänzlich. Keineswegs löst sich das Zink einfach in der Säure unter Verdrängung von Wasserstoff und Produktion von Wärme, sondern der Vorgang ist wesentlich elektrochemisch, der Wasserstoff wird am Platin, die Wärme im Schliessungsdrahte entwickelt.

Es verbinden sich auch Wasserstoff und Sauerstoff bei

gewöhnlicher Temperatur, nicht mit einander, ausser unter Mitwirkung eines Volta'schen Stromes. Man muss die beiden Gase in getrennten Glasglocken sammeln (E_1 und E_2 Fig. 101), welche in ein Gefäss mit angesäuertem Wasser tauchen, welches auch die unteren Teile der Glocken erfüllt. In diese taucht je eine Platinelektrode. Bei dieser

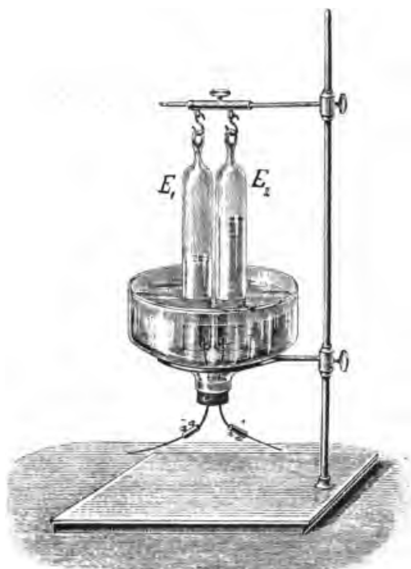


Fig. 101. Wasserstoffsauerstoffelement.

Anordnung tritt natürlich noch weniger eine chemische Reaktion zwischen dem Sauerstoff und Wasserstoff ein, als wenn man diese Gase mischt. Verbindet man nun aber die beiden Elektroden durch einen Schliessungsdraht, so tritt in demselben sofort ein Volta'scher Strom auf, welcher in der Säure von der Sauerstoffglocke zur Wasser-

stoffglocke fliesst und den Sauerstoff von der einen Elektrode zu der anderen führt, wo dieser sich mit dem Wasserstoff zu Wasser verbindet. Beide Glocken verlieren also allmählich ihren Gasinhalt.

§ 185. Der chemische Umsatz in einem Elemente und die Wärmeproduktion in dem Schliessungskreise sind einander äquivalent. Es besteht deshalb ein Zusammenhang zwischen dem Faraday'schen Gesetz der Elektrolyse (§ 180) und dem Joule'schen Gesetz der Wärmewirkung des Stromes (§ 168).

Ein Akkumulator liefert in einem Schliessungskreise von gegebenem Widerstande einen Strom, welcher einerseits einen bestimmten chemischen Umsatz in dem Elemente, andererseits die äquivalente Wärmeproduktion in dem Schliessungskreise bewirkt.

Erzeugt man den Strom in demselben Stromkreise mittels zweier hintereinander geschalteter Akkumulatoren, so hat derselbe die doppelte Strommenge, bewirkt also in jedem der beiden Akkumulatoren den doppelten chemischen Umsatz, das ist im ganzen den vierfachen chemischen Umsatz. Es muss also auch die Wärmeproduktion im Schliessungskreise viermal grösser sein.

a) In einem Schliessungskreise von gegebenem Widerstande ist sonach die Wärmeproduktion dem Quadrate der Strommenge proportional.

Nehmen wir nicht nur eine Batterie von der doppelten Elementenzahl, sondern auch einen Schliessungskreis vom doppelten Widerstande, so wird in demselben der frühere Strom auftreten. Der chemische Umsatz in den Elementen

ist nun aber doppelt so gross, weil ihre Zahl verdoppelt ist und in jedem Element derselbe Umsatz stattfindet wie früher. Es wird also auch die Wärmeproduktion im Schliessungskreise doppelt so gross sein.

b) Bei gegebener Strommenge ist also die Wärmeproduktion dem Widerstande des Schliessungsdrahtes proportional.

Die beiden unter a) und b) angeführten Gesetze geben vereinigt das Joule'sche Gesetz der Wärmewirkung eines Stromes, welches wir hier aus dem Faraday'schen Gesetze abgeleitet haben, welches besagt, dass der chemische Umsatz in einer elektrolytischen Zelle oder in einem Elemente der Strommenge proportional ist.

§ 186. Bei geöffnetem Stromkreise erzeugt ein gutes Element keine Wärme, weil der chemische Prozess in demselben stillsteht. Immerhin kann man jene chemischen Prozesse, welche in dem Elemente bei geschlossenem Strome stattfinden, auch auf rein chemischem Wege und scheinbar ohne elektrische Nebenwirkungen zustande bringen, und kann dann die chemische Wärmeproduktion dieser Prozesse messen.

Kennt man diese, so kann man nun aus dem Faraday'schen (und Joule'schen) Gesetze die Spannung berechnen, welche das Element liefert.

Wenn man z. B. gewöhnliches Zink in eine Lösung von schwefelsaurem Kupferoxyd eintaucht, so wird das Zink unter Bildung von schwefelsaurem Zinkoxyd aufgelöst und es scheidet sich dafür metallisches Kupfer ab. Es ist dabei Sauerstoff von dem Kupferoxyd auf das Zink

übergegangen. Wenn 20,4 Milligramme Zink auf diese Weise gelöst werden, so sind 5 Milligramme Sauerstoff übergegangen und hierbei entwickelt sich eine Wärmemenge, welche hinreicht, 15 g Wasser um 1^0 Celsius zu erwärmen.

Aus Zink, Kupfer und den Lösungen der beiden schwefelsauren Salze lässt sich ein sehr gutes Element zusammenstellen. Man füllt Kupfervitriollösung in ein poröses Thongefäss und stellt die Kupferelektrode, welche einen Pol des Elementes bilden soll in dasselbe. Das Thongefäss wird in einen grösseren Glasbecher getaucht, welcher mit Zinkvitriollösung gefüllt ist und in welches der Zinkpol des Elementes taucht (Fig. 102). Verbindet man nun beide Pole durch einen Draht, so tritt ein Strom auf, welcher pro Ampère und Minute 5 Milligramme Sauerstoff zu dem Zinkpol führt. Das Zink löst sich auf, während sich Kupfer an der Kupferelektrode abscheidet. Das Element muss nach obigem pro Ampère und Minute so viel Wärme entwickeln, als hinreicht 15 g Wasser um 1^0 Celsius zu erwärmen.



Fig. 102.
Daniell'sches Element.

Diese Wärme tritt aber nicht in dem Elemente selbst, sondern in dem Schliessungskreise desselben auf. Ist in demselben die Spannung 1 Volt vorhanden, so tritt

nach § 168 pro Ampère und Minute soviel Wärme auf, als hinreicht $^1/_{70}$ l = 14,3 g Wasser um 1° Celsius zu erwärmen. Ist aber eine ein wenig grössere Spannung von 1,1 Volt) vorhanden, so tritt pro Ampère und Minute soviel Wärme auf, als hinreicht 15 g Wasser um 1° Celsius zu erwärmen. Gerade so viel Wärme entwickelt nun unser Element pro Ampère und Minute, seine Spannung muss also 1,1 Volt sein, wie dies thatsächlich zutrifft.

Ebenso können wir die Spannung eines Akkumulators berechnen. Wenn sich 5 Milligramme Sauerstoff mit Blei zu Bleioxyd verbinden, so tritt hierbei so viel Wärme auf, als hinreicht 16,2 g Wasser um 1° Celsius zu erwärmen. Wenn ferner Bleisuperoxyd unter Abscheidung von 5 Milligramm Sauerstoff zu Bleioxyd reduziert wird, so tritt hierbei Kälte auf, welche hinreicht 3,5 g Wasser um 1° Celsius abzukühlen. Beide Prozesse zusammen können also 12,7 g Wasser um 1° Celsius erwärmen. Löst sich das an beiden Polplatten gebildete Bleioxyd in den Säuren auf, so entsteht ausserdem eine Wärme, welche 15,2 g Wasser um 1° Celsius erwärmen kann.

Diese sämtlichen Prozesse können also 27,9 g Wasser um 1° Celsius erwärmen, und sie treten pro Ampère und Minute in einem Akkumulator ein.

Da ein Element von 1 Volt Spannung pro Ampère und Minute nach obigem nur so viel Wärme liefert, als hinreicht 14,3 g Wasser um 1° Celsius zu erwärmen, ein Akkumulator aber fast doppelt so viel Wärme liefert, so

muss er fast die doppelte Spannung (2 Volt) haben, was thatsächlich zutrifft.

§ 187. In solcher Weise wirken jedoch nur gute Elemente, welche sich auch dadurch kennzeichnen, dass ihre Spannung bei verschiedenen Temperaturen denselben Wert behält. Andere Elemente, deren Spannung mit der Temperatur sinkt, wirken nicht so gut. Nur ein Teil der Wärme, welche die chemischen Prozesse liefern, verwandelt sich in die Stromwärme im Schliessungskreise, der andere Teil der Wärme tritt im Elemente selbst auf. Die Spannung dieser Elemente ist also kleiner, als der ganzen Wärmeproduktion entsprechen würde. Es giebt aber auch Elemente, deren Spannung mit der Temperatur steigt. Diese liefern merkwürdigerweise mehr Wärme in ihrem Schliessungskreise, als die chemischen Prozesse, die sich in ihnen abspielen, liefern können. Solche Elemente kühlen sich ab, während sie Strom liefern. Es giebt sogar Elemente, in welchen chemische Prozesse vorgehen, die an sich eine Abkühlung bewirken. Diese Elemente liefern unter sehr starker eigener Abkühlung Wärme in ihrem Schliessungskreise. In allen diesen Fällen sinkt die Spannung des Elementes während es Strom liefert immer mehr und mehr bis auf Null, wenn man es nicht künstlich auf konstanter Temperatur erhält. Nur in den konstanten Elementen, welche sich weder abkühlen noch erwärmen, ist die Spannung unveränderlich. Nie hebt sich die Spannung eines Elementes, während dasselbe Strom liefert.

SECHSTE VORLESUNG.

Der magnetische Wirbel des Volta'schen Stromes.

1. Einleitung.

§ 188. Bis zu den Untersuchungen Gilbert's (1600) hielt man die elektrischen Anziehungen für magnetische Wirkungen. Seit man die wesentlichen Unterschiede der elektrischen und magnetischen Erscheinungen kennen gelernt hatte, hielt man dieselben jedoch scharf auseinander und auch wir haben die magnetischen und elektrischen Strömungen bisher wie zwei von einander ganz unabhängige Erscheinungen betrachtet.

Dennoch liess die Ähnlichkeit dieser zwei strömungsartigen Erscheinungen den Gedanken nie ganz erlöschen, dass zwischen ihnen eine wesentliche Verwandtschaft bestehe, doch waren bis zum Jahre 1820 nur sehr spärliche diesbezügliche Anzeichen bekannt. Man wusste, dass Blitzschläge imstande sind stählerne Gegenstände zu magnetisieren, und dass Kompassnadeln in vom Blitz getroffenen Schiffen oft ummagnetisiert sind, so dass ihr früherer Nordpol nun nach Süden weist. Man vermochte auch,

diese Wirkungen des Blitzes durch künstliche elektrische Funken nachzuahmen. Immerhin liess sich daraus kein bestimmter Schluss auf eine Beziehung zwischen Elektrizität und Magnetismus ziehen, denn mechanische Erschütterungen, z. B. Hammerschläge, haben ähnliche Wirkungen auf Stahlstücke und Magnete wie elektrische Funken.

§ 189. Da machte man, nachdem man bereits 25 Jahre lang den Volta'schen Strom kannte, ganz unerwartet und zufällig die Entdeckung, dass jeder Volta'sche Stromkreis, so lange der Strom geschlossen ist, kräftige magnetische Wirkungen äussert. So wie man den Stromkreis schliesst, lenkt derselbe jede in der Nähe stehende Magnetnadel kräftig aus dem magnetischen Meridiane ab, sowie man den Strom wieder öffnet, hört seine magnetische Wirkung sofort auf und die Magnetnadel zeigt wieder nach Norden.

Die Überraschung der Physiker über dieses bis dahin übersehene Phänomen war eine grosse. Nicht nur, dass man nun einen engen Zusammenhang zwischen Elektrizität und Magnetismus gefunden hatte, es war auch eine ganz neue Art des Magnetismus hiermit entdeckt, ein Magnetismus, welcher nicht an Eisen und Stahl gebunden ist. Der Stromkreis besteht aus Kupfer und hat doch so lange er vom elektrischen Strome durchflossen wird, eine Wirkung wie ein stählerner Magnet.

Jeder Volta'sche Strom wird von einem kräftigen magnetischen Strome begleitet. Wir wollen nun den Verlauf dieses magnetischen Begleitstromes näher kennen lernen.

2. Der magnetische Wirbel eines geradlinigen Volta'schen Stromes.

§ 190. Wir betrachten zunächst den einfachsten Fall dass der Stromdraht geradlinig ist. Solche geradlinige Ströme sind allgemein bekannt, da sie in der Technik häufig verwendet werden. Der Strom in einem Telegraphendraht oder in der Oberleitung einer elektrischen Trambahn ist ein solcher geradliniger horizontal verlaufender Strom.

Wir bestimmen die Richtung und Stärke des magnetischen Begleitstromes mit Hilfe eines magnetischen Fähnchens nach § 85 und 86.

Es zeigt sich, dass die magnetische Strömung in der Umgebung des Leitungsdrahtes nicht von diesem ausgeht, auch nicht demselben parallel fliesst, sondern sie umfliesst den Stromleiter in Kreisen, deren Ebenen auf demselben senkrecht stehen, und welche also über den Stromleiter geschoben sind, wie viele verschieden weite Armbänder über einen Arm.

Man muss den Stiel des Fähnchens dem Stromleiter parallel halten. Das Fähnchen zeigt dann nicht gegen den Stromleiter und nicht von dem Stromdraht hinweg, sondern nach seitwärts. Geht man dem Fähnchen nach, so bewegt man sich auf einem Kreise, bleibt immer in gleicher Entfernung von dem Stromdraht und kommt wieder zu dem Ausgangspunkte zurück. Diese magnetische Strömung geht also von keinem Körper aus und gegen keinen Körper hin, sie verläuft ganz in der Luft. Jeder Stromfaden ist kreisförmig geschlossen. Die magnetische

Strömung bildet einen Wirbel, welcher den Stromdraht umkreist, dessen Axe der Stromdraht ist.

Fig. 103 stellt den senkrechten Querschnitt durch den Stromdraht durch einen schraffierten Kreis dar. Man ersieht die kreisförmigen magnetischen Stromfäden in der

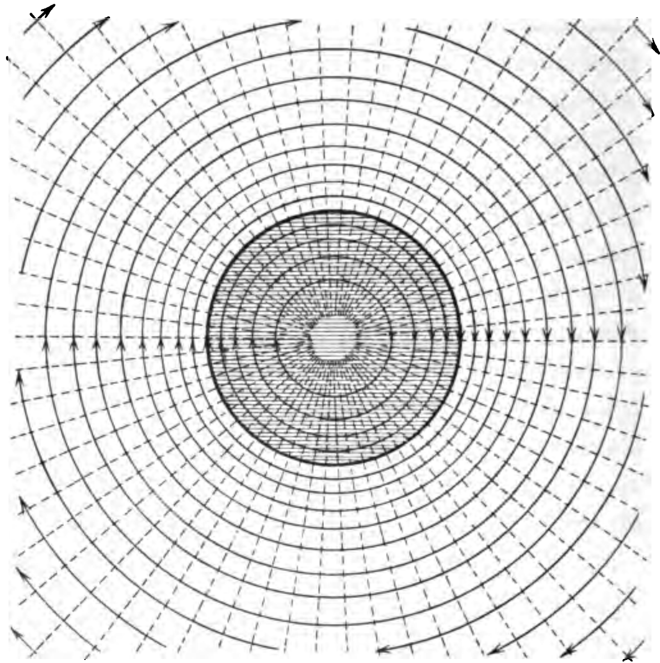


Fig. 103. Magnetischer Wirbel um einen Stromdraht.

Umgebung desselben. Dieselben sind in der Nähe des Stromleiters eng, dort ist die Strömung stark. In grösserer Entfernung wird sie schwächer, und zwar nimmt sie genau im verkehrten Verhältnis der Entfernung ab. (Vgl. § 59.) Die magnetischen Kreise vom kleinsten Radius haben die stärkste magnetische Strömung.

Die magnetischen Niveauflächen sind Ebenen, welche alle durch den Stromdraht gehen und in Fig. 103 durch punktierte Linien angedeutet sind. Sie zerlegen alle kreisförmigen magnetischen Stromfäden in die gleiche Anzahl N Stromzellen. Diese Zahl N heisst die motorische Kraft des magnetischen Wirbels und ist bestimmt durch die elektrische Strommenge, welche in dem Drahte fliesst.

Je stärker nämlich der elektrische Strom ist, desto stärker ist auch der magnetische Begleitstrom, desto enger sind seine Stromfäden, desto kürzer seine Stromzellen, desto zahlreicher also die Niveauschichten und desto grösser die motorische Kraft N des magnetischen Wirbels.

In Fig. 103 ist angenommen, dass der elektrische Strom von oben nach unten durch die Zeichnungsebene fliesst. Der magnetische Begleitstrom kreist dann von oben gesehen im Sinne des Uhrzeigers. Kehrt man die Richtung des elektrischen Stromes um, so kehrt auch der magnetische Begleitstrom seine Richtung um und fliesst gegen den Sinn des Uhrzeigers.

3. Der magnetische Wirbel eines Volta'schen Stromkreises.

§ 191. Mag der Stromleiter wie immer gekrümmt sein, er muss immer ringförmig geschlossen sein, denn der Volta'sche Strom fliesst immer in geschlossenen Ringen, er bildet einen elektrischen Wirbel.

Dieser ringförmige Stromleiter wird nun immer von dem magnetischen Wirbel umflossen, derart, dass er selbst die Mittellinie des magnetischen Wirbelringes bildet. So

wie die Luftströmung um ein Rauchringel (siehe § 19) fliesst die magnetische Strömung um einen kupfernen Stromring. In Fig. 104 ist ein Querschnitt durch einen solchen Stromring dargestellt. Die schraffierten Flächen stellen die beiden Querschnitte des ringförmigen Kupfer-

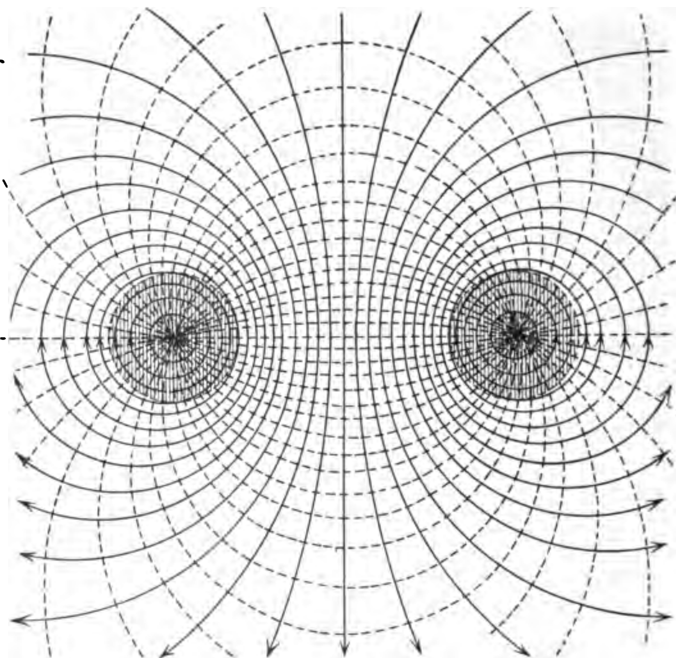


Fig. 104. Magnetischer Wirbel eines Volta'schen Stromes (Querschnitt).

drahtes dar. Die magnetische Strömung fliesst von oben nach unten durch die Öffnung des Stromringes, breitet sich unten federbuschartig aus, fliesst ausserhalb des Stromringes wieder nach oben, sammelt sich oberhalb desselben wieder federbuschartig, um abermals durch

die Öffnung des Stromringes zu fliessen. Jeder magnetische Stromfaden ist kreisförmig geschlossen. In der Nähe des Stromleiters sind die magnetischen Stromfäden eng, dort ist die magnetische Strömung stark. In grösserer Entfernung wird sie schwächer.

Die magnetischen Niveauflächen sind in Fig. 104 durch gestrichelte Linien angedeutet. Sie zerlegen all die ringförmigen Stromfäden in die gleiche Anzahl *N* Stromzellen. Diese Zahl *N* heisst die motorische Kraft

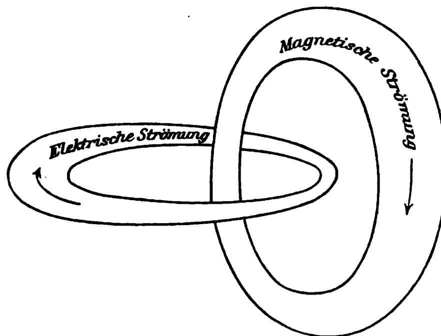


Fig. 105. Zusammenhang der magnetischen und elektrischen Ringe.

des magnetischen Wirbels und ist bestimmt durch die elektrische Strommenge, welche in dem Drahte fliesst. Je stärker nämlich der elektrische Strom ist, desto stärker ist auch der magnetische Begleitstrom, desto enger sind seine Stromfäden, desto kürzer seine Stromzellen, desto zahlreicher also auch die Niveauschichten und desto grösser die motorische Kraft *N* des magnetischen Wirbels.

Die magnetischen Stromringe hängen mit dem elektrischen Stromring kettenringartig zusammen, d. h. sie sind auf ihm aufgereiht, wie zahlreiche kleinere Ringe

auf einem Schlüsselring. Fig. 105 zeigt schematisch diesen Zusammenhang zwischen einem elektrischen und magnetischen Ring. Was die Richtung der magnetischen Strömung betrifft, so ist sie aus Fig. 105 zu ersehen. Geht man der Richtung des elektrischen Stromes nach, so erblickt man die Strömung in allen magnetischen Ringen gegen die Richtung des Uhrzeigers fliessend.

Kehrt man die Richtung des elektrischen Stromes um, so kehrt sich also auch die Richtung der magnetischen Strömung in allen ihren Stromringen um.

4. Solenoide und Stromspulen.

§ 192. Stellt man zwei Stromkreise dicht nebeneinander, so summieren sich ihre magnetischen Wirkungen und man erhält einen kräftigeren magnetischen Wirbel. Fig. 106 stellt den Querschnitt durch diesen doppelten Stromkreis und den dazu gehörigen magnetischen Wirbel dar. Die schraffierten Kreisflächen sind die Querschnitte der Leitungsdrähte. Jeder dieser Querschnitte wird zunächst von einigen ringförmigen magnetischen Stromfäden unmittelbar und eng umflossen. Jeder dieser Stromfäden zerfällt in Zellen. Die weiteren magnetischen Stromfäden sind biskuitförmig und jeder von ihnen umschlingt beide Stromringe, so dass er in doppelt so viele Stromzellen zerfällt, als die kleinen Ringe, welche nur je einen Stromdraht unmittelbar umgeben. Diese Stromzellen sind in der Öffnung der Stromringe sehr kurz, dort ist die magnetische Strömung stark, fast doppelt so stark, als wenn nur ein Stromring vorhanden wäre.

Stellt man drei Stromringe nebeneinander, so erhält man einen dreimal so starken magnetischen Wirbel. Fig. 107 stellt den Querschnitt durch 16 nebeneinander gestellte Stromkreise und den durch die Öffnungen derselben fliessenden magnetischen Wirbel dar. Die moto-

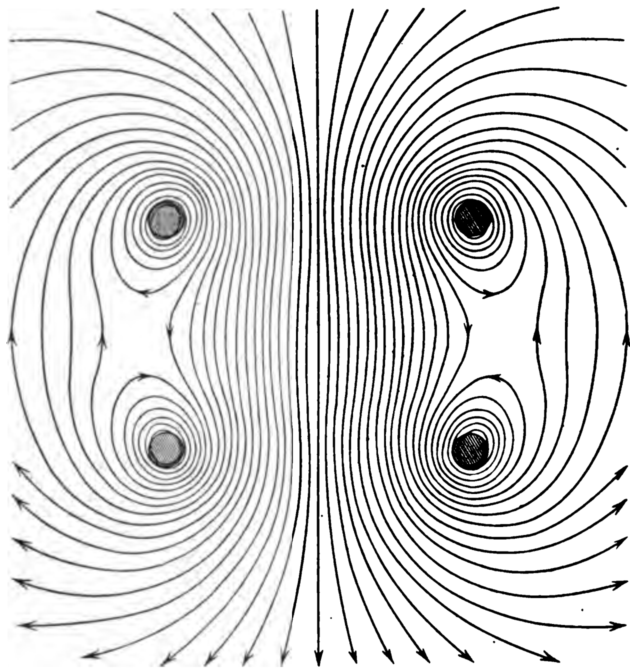


Fig. 106. Zwei horizontale Stromkreise (Querschnitt).

rische Kraft desselben ist 16 mal so gross als jene eines magnetischen Wirbels, welcher nur durch einen der Stromkreise erzeugt wird und auch die Stärke der mitten durch die Öffnung der Ringe fliessenden Strömung ist nahezu 16 mal so gross.

Man braucht nicht jeden dieser Stromringe durch ein besonderes Volta'sches Element mit Strom zu versorgen,

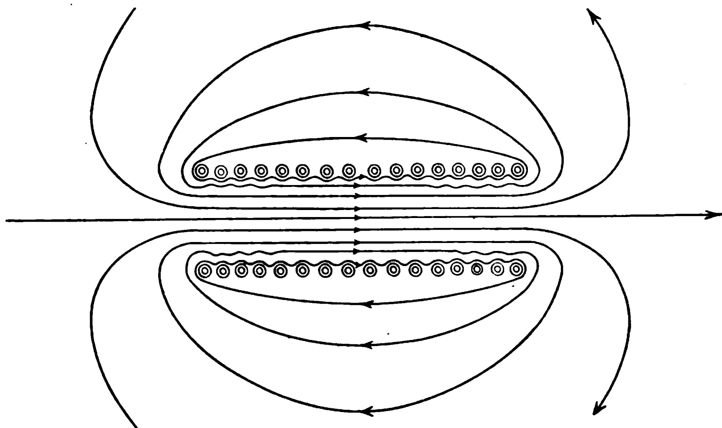


Fig. 107. Solenoid (Querschnitt).

sondern kann die 16 Ringe in denselben Stromkreis hintereinander schalten. Man wickelt einen Stromdraht zu einer Schraubenlinie (Fig. 108) auf und sendet durch dieses „Solenoid" einen Strom. Durch den hohlen Innenraum des Solenoides fliesst dann ein lebhafter magnetischer Strom der Länge nach, tritt vorn aus, breitet sich federbuschartig aus, fliesst nach rückwärts, sammelt sich wieder federbuschartig und fliesst rückwärts in das Solenoid hinein. (Siehe Fig. 107.)



Fig. 108. Solenoiddraht, perspektivisch.

Will man noch stärkere magnetische Wirbel erzeugen,

so verwendet man die Stromspulen. Man wickelt einen (mit Seide übersponnenen) Stromdraht wie einen Zwirnfaden auf eine Spule. Man kann ihn z. B. in 100 Windungen aufwickeln. Dieses Solenoid oder diese Stromspule wirkt dann 100 mal so stark magnetisch wie ein einfacher Stromkreis, welcher von demselben Strom durchflossen wird (Fig. 109). Die magnetische Strömung fliesst durch die hohle Öffnung der Spule der Länge nach hindurch, breitet sich vorn federbuschartig aus, fliesst aussen neben der Spule nach rückwärts und wieder in die Spule hinein.

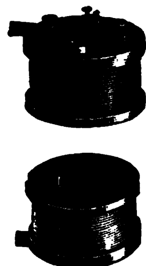


Fig. 109. Stromspulen.

Die Ähnlichkeit dieses Wirbels mit dem Wirbel eines Stahlmagnetes (§ 100 Fig. 47) fällt in die Augen. Nur verläuft der ganze von einer Stromspule erzeugte magnetische Wirbel in Luft, falls auch in dem Hohlraum der Spule Luft ist, während der Wirbel eines Magnetstabes der Länge nach durch diesen, also auf diesem Teile seines Weges durch Stahl fliesst.

5. Elektromagnete.

§ 193. Jeder Wirbel zeichnet sich dadurch aus, dass nicht seine Stromstärke, sondern seine motorische Kraft bestimmt ist. Je besser durchlässig der Weg ist, welchen man ihm bietet, desto grösser wird seine Strommenge. Wir haben diese Wirkung bereits in auffallender Weise bei den elektrischen Wirbeln gesehen, wir haben gesehen, um wie viel heftiger der Volta'sche Strom durch einen

gut leitenden Schliessungsdraht fliesst, als die elektrische Strömung, welche das ungeschlossene Element durch die Luft sendet (§ 160).

Eine ähnliche Verstärkung erfährt der magnetische Wirbel, welcher den Volta'schen Strom umkreist, wenn man ersteren nicht in Luft, sondern in Eisen verlaufen lässt. Fig. 110 stellt zwei kettenringartig zusammenhängende Metallringe dar. Der eine desselben besteht aus Kupfer und ist von einem Volta'schen Strome

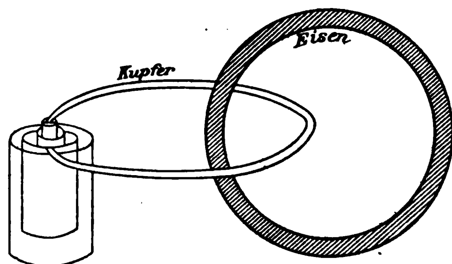


Fig. 110. Eisenring vom magnetischen Strom durchflossen.

durchflossen zu denken. Durch den eisernen Ring fliessen dann einige magnetische Stromfäden des magnetischen Wirbels, welcher den Volta'schen Strom umkreist. Da das Eisen 400 mal durchlässiger für den magnetischen Strom ist, so ist die magnetische Strömung in dem Eisenring 400 mal stärker als sie an gleicher Stelle wäre, wenn der Eisenring nicht vorhanden wäre, und als sie unmittelbar neben dem Eisenringe ist.

Ähnlich erklärt sich die hohe Wirksamkeit der von Arago erfundenen Elektromagnete. Man füllt den Innenraum einer Stromspule durch einen Stab aus

weichem Eisen aus oder wickelt direkt den kupfernen (mit Seide übersponnenen) Leitungsdraht um einen Eisenstab (Fig. 111).

Der magnetische Wirbel, welcher den durch diese Stromspule gesandten Volta'schen Strom begleitet, fliesst der Länge nach durch diesen Eisenstab und findet auf diesem Wege wegen der hohen Durchlässigkeit des Eisens nur sehr geringen Widerstand. Auf dem Wege durch die Luft, indem er von dem einen Ende des Eisenstabes gegen das andere zurückfliesst, findet er ebenfalls geringen Widerstand, weil er auf diesem Wege sich weit ausbreiten kann. Diese Stromspulen mit weichem Eisenkerne, welche man Elektromagnete nennt, haben deshalb magnetische Wirkungen, welche ungefähr 300 mal stärker sind als die magnetischen Wirkungen derselben Stromspule ohne Eisenkern, und welche schon bei mässiger Stärke des Volta'schen Stromes kräftiger sind als die Wirkungen des besten Stahlmagnetes von gleicher Form.

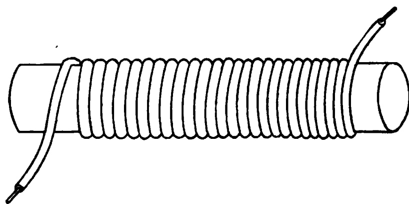


Fig. 111. Elektromagnet.

Ausserdem hat man bei den Elektromagneten den Vorteil, die magnetische Wirkung nach Belieben entstehen und verschwinden lassen zu können, indem man einfach den Volta'schen Strom, welcher durch die Spule des Elektromagneten fliesst, schliesst oder unterbricht.

6. Technische Anwendungen der Elektromagnete.

§ 194. Die eben erwähnten Eigenschaften der Elektromagnete sichern denselben eine hervorragende technische Anwendbarkeit und fast alle elektrotechnischen Apparate

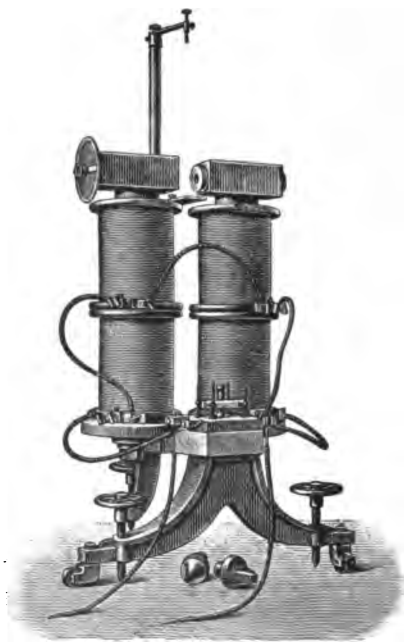


Fig. 112. Hufeisenförmiger Elektromagnet.

und Maschinen enthalten als wesentlichen Bestandteil einen Elektromagnet.

Die Physiker bedienen sich, um möglichst starke magnetische Strömungen zu erzeugen, grosser Elektromagnete von Hufeisenform (Fig. 112 und 113). Der

Eisenkern derselben hat die Form eines fast völlig geschlossenen Ringes (Fig. 113), welcher mit dem Stromdraht umwickelt ist. Da die Enden des Eisenkernes einander sehr nahe stehen, so hat die magnetische Kreisströmung nur einen sehr kurzen Weg durch die Luft zurückzulegen, im übrigen verläuft sie in Eisen und ist also sehr stark. Man kann, wenn man einen kräftigen Volta'schen Strom durch die Spule schickt, zwischen den Polen

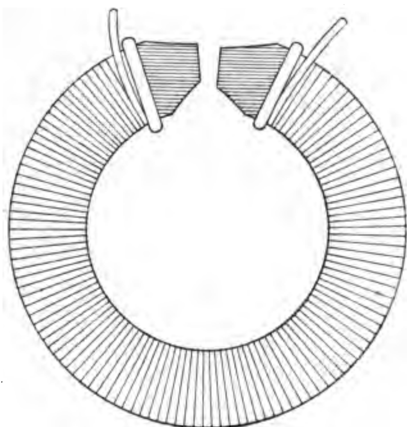


Fig. 113. Hufeisenförmiger Elektromagnet.

des Magnets eine magnetische Strömung erhalten, welche 50000 mal stärker ist, als die erdmagnetische Strömung.

Wir haben hiermit durch allmähliche Variation der Krümmung des Stromleiters eine Anordnung erhalten, welche gerade umgekehrt ist, wie der magnetische Wirbel, welcher einen einfachen Volta'schen Stromkreis umfliesst. Bei unserem Elektromagnet bildet der magnetische Strom einen einfachen Kreis und dieser wird von den elektrischen Stromringen umflossen.

§ 195. Die wichtigste technische Anwendung der Elektromagnete bilden die Elektromotoren oder elektrischen Arbeitsmaschinen, welche die Dampfmaschinen und Wassermotoren vielfach verdrängt haben, und besonders zum Antriebe der elektrischen Bahnen verwendet werden.

Ein Elektromotor besteht im wesentlichen aus drei Teilen: 1. aus einem grossen feststehenden Elektromagnet M (Fig. 114), 2. aus einem drehbarem Elektromagnet m und 3. aus einem Stromwender $a\ b$, welcher mit dem beweglichen Magnet verbunden ist, und durch diesen gedreht wird.



Fig. 114. Elektromotor (schematisch).

Durch die Spule des feststehenden Elektromagnetes wird ein konstanter Volta'scher Strom geschickt. Der Strom, welcher durch die Spule des drehbaren Elektromagnetes fliesst, wechselt jedoch fortwährend seine Richtung, wenn sich dieser Magnet dreht, weil durch diese Drehung der Stromwender zur Wirkung kommt.

Der Stromwender besteht in gar nichts anderem als den beiden Enden a_1 und a_2 des auf die Spule des

drehbaren Magnets gewickelten Drahtes und aus zwei feststehenden Bürsten b_1 b_2, von welchem die eine in Fig. 114 vor, die andere hinter den Drähten a_1 und a_2 zu denken ist, und durch welche der Strom zugeleitet bezw. abgeleitet wird. Bei der gezeichneten Stellung ist der Strom unterbrochen, weil die Drahtenden a_1 a_2 die Bürsten b_1 b_2 nicht berühren. Dreht sich der Magnet um 90°, so berührt a_1 die Bürste b_1 und a_2 die Bürste b_2 der Magnet erhält magnetische Wirkung, welche ihn sogleich in die in Fig. 114 dargestellte Stellung zurückdreht, bei welcher die magnetische Strömung durch beide Magnete ringförmig fliessend ihren Weg möglichst abgekürzt hat. Gleichzeitig ist der Strom unterbrochen, der Magnet *m* dreht sich infolge der erlangten Geschwindigkeit um 90° weiter, wodurch der Strom wieder geschlossen wird, jetzt aber in umgekehrtem Sinne durch die Spule fliesst, weil a_1 die Bürste b_2, a_2 die Bürste b_1 berührt. Die wieder auftretende magnetische Kraft dreht den Magnet im selben Sinne um 90° weiter u. s. f. Der drehbare Magnet rotiert so fortwährend mit grosser Kraft, und diese Drehung kann durch Riemscheiben oder Zahnräder übertragen und nutzbar gemacht werden. Fig. 115 stellt einen grösseren Elektromotor mit seiner ganzen Ausrüstung dar.

Eine primitive Form der Elektromotoren sind die elektrischen Klingeln und die automatischen Stromunterbrecher.

§ 196. Auch die Telegraphie beruht auf der Wirkung der Elektromagnete. In der Aufgabestation I

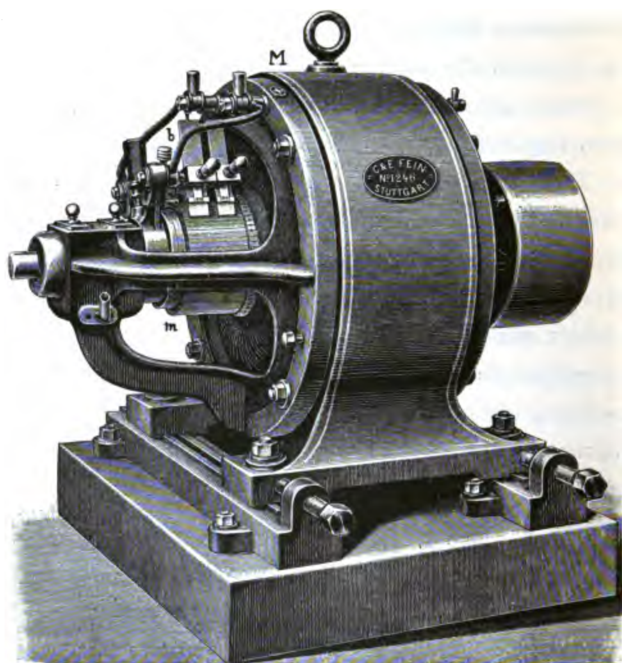


Fig. 115. Elektromotor.
M feststehender Magnet, *m* drehbarer Magnet, *b* Zuleitungsbürsten.

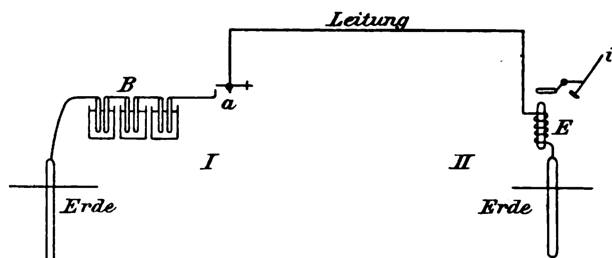


Fig. 116. Elektromagnetische Telegraphie.

steht eine Volta'sche Batterie *B* Fig. 116. Ein Pol derselben ist zur Erde abgeleitet, von dem anderen Pol geht die Telegraphenleitung bis zu der weit entfernten Empfangsstation II, dort wird der Strom durch die Spule eines Elektromagnets *E* geschickt und fliesst dann zur Erde ab. Der Strom fliesst dann durch die Erde zur Station I

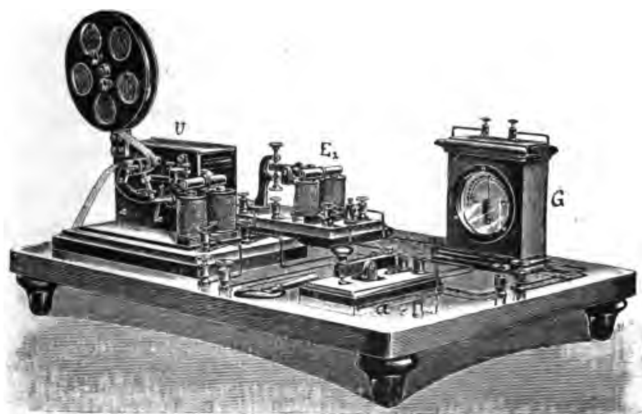


Fig. 117. Telegraphischer Empfangs- und Aufgabsapparat.
U ein Uhrwerk, welches das Papierband an dem Schreibstift vorbeizieht. *G* ein Strommesser. *a* der Stromunterbrecher des Aufgabsapparates. E_2 Klopfer (Empfangsapparat ohne Schreibstift, welcher hörbare Zeichen giebt).

zurück. Diese Erdleitung hat zufolge ihres mächtigen Querschnittes einen kaum merklichen Widerstand.

Schliesst man in Station I den Strom, so zieht der Magnet *E* in Station II einen Eisenanker an, und drückt damit den Schreibstift *i* auf das Papierband. Öffnet man in Station I wieder den Strom, so hört der Stift in Station II zu schreiben auf.

Statt des Schreibstiftes kann der Empfangsapparat auch den Klöppel einer Signalglocke in Bewegung setzen, oder eine Signalscheibe drehen etc. Fig. 117 stellt einen telegraphischen Apparat dar.

7. Magnetische Messung des Volta'schen Stromes.

§ 197. Wie bereits in § 190 und § 191 hervorgehoben wurde, ist der magnetische Wirbel, welcher einen Volta'schen Strom umkreist, desto stärker, je grösser die elektrische Strommenge des letzteren ist. Man hat also in der magnetischen Wirkung des Volta'schen Stromes ein sehr brauchbares Mass der elektrischen Strommenge desselben.



Fig. 118. Galvanometer mit drei Stromringen.

Ein magnetischer Strommessapparat (Galvanometer, Ampèremeter) besteht aus einem irgendwie geformten, fest aufgestellten Stromdraht, in deren Nähe eine Magnetnadel steht. Je stärker der Strom ist, welcher durch den Galvanometerdraht gesendet wird, desto mehr wird die Magnetnadel abgelenkt.

Gewöhnlich giebt man dem Stromdraht Kreisform, indem die Zuleitung *z* und Ableitung *a* (Fig. 119) des Stromes knapp neben einander führt. Der Stromkreis

wird in die Ebene des magnetischen Meridian gestellt und in seine Mitte eine Magnetnadel gestellt. Hat der Stromkreis 30 cm Radius, so zeigt die Magnetnadel einen Strom von 1 bezw. 2, 3, 4 Ampère durch einen Ausschlag von bezw. 0,9°, 1,8°, 2,7°, 3,6° an.

§ 198. Kennt man die Dimensionen eines Galvanometers nicht genau genug, um seine Wirkung berechnen

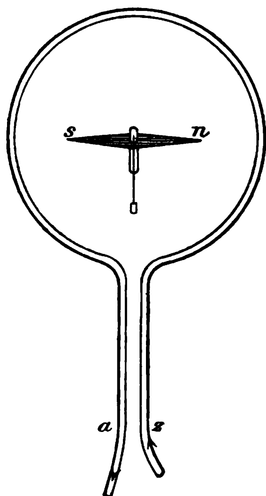


Fig. 119. Galvanometer mit einfachem Stromring.



Fig. 120. Multiplikator mit Spule von 30 Windungen.

zu können, so kann man dasselbe graduieren, indem man es hinter ein Knallgasvoltameter (§ 181) schaltet. Die in diesem von dem Strome entwickelte Gasmenge lässt die Strommenge desselben erkennen, und man kann sonach konstatieren, welche Ausschläge die Galvanometer-

nadel bei verschiedener Stärke des durch das Galvanometer fliessenden Stromes giebt.

§ 199. Um kleinere Strommengen zu messen, verwendet man an Stelle des einfachen Stromringes eine Stromspule. (Fig. 120.) Hat dieselbe z. B. 100 Drahtwindungen, so lenkt schon ein Strom von $^1/_{100}$ Ampère

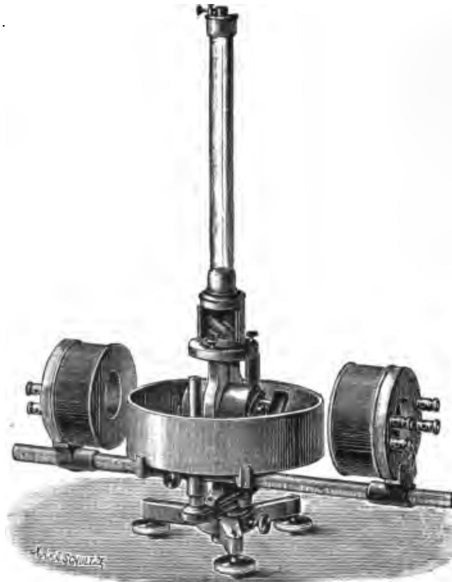


Fig. 121. Multiplikator mit Spule von 30000 Windungen. Die Spulen sind der Deutlichkeit wegen ausserhalb des eisernen Schutzringes.

die Magnetnadel ebenso stark ab, wie in dem Galvanometer mit einfachem Stromkreis erst ein Strom von 1 Ampère. Das Instrument ist also 100 mal empfindlicher und heisst Multiplikator-Galvanometer. Zur Messung der schwächsten Ströme verwendet man Multiplikatoren,

deren Spulen aus 30000 Windungen eines feinen (mit Seide umsponnenen) Kupferdrahtes haben. Mit diesen kann man noch Volta'sche Ströme messen, deren Strommenge kleiner als 1 Millionstel Ampère ist. Um das Instrument noch empfindlicher zu machen, schwächt man die erdmagnetische Richtkraft ab, so dass die Magnetnadel noch leichter aus dem Meridiane abgelenkt wird. Als äusserste Grenze der Leistungsfähigkeit eines Multiplikators kann man die Anzeige von 1 Billionstel Ampère betrachten. Dieser enorm schwache Strom würde in einem Knallgasvoltameter selbst in 10 Stunden nicht viel mehr als 1 Millionstel Cubikmillimeter Knallgas entwickeln, also auf anderem als magnetischem Wege kann nachweisbar sein.

8. Magnetische Kraftwirkungen zweier Volta'scher Ströme.

§ 200. Die Ablenkung einer Magnetnadel durch einen Volta'schen Strom beruht auf dem Verkürzungsstreben des durch den Strom und die Magnetnadel bewirkten Kraftflusses. Fig. 122 und 123 stellen den Querschnitt durch einen Stromleiter *o* dar, in dessen Nähe eine Magnetnadel *ns* steht. Das ohrförmig gekrümmte Strombündel, welches in Fig. 122 an den Polen der Nadel sitzt, sucht sich zu verkürzen und bringt die Nadel in die in Fig. 123 dargestellte Lage.

Macht man einen Stromkreis leicht beweglich, so wird derselbe, wenn man einen Magnet in die Nähe bringt, gedreht, und stellt sich so ein, dass die von dem

Magnetstabe ausgehende Strömung möglichst voll durch die Öffnung des Stromkreises fliesst und dass der elektrische Strom, in der Richtung der magnetischen Strömung betrachtet, gegen den Uhrzeigersinn umfliesst.

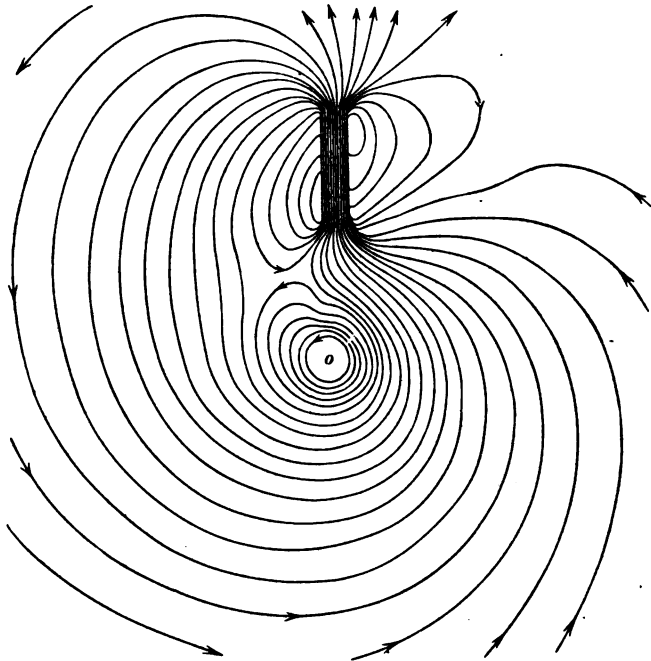


Fig. 122. Magnetnadel neben einem geradlinigen auf der Zeichnungsebene senkrechten Strom.

Statt des Magnetstabes kann man mit demselben Erfolge auch einen Elektromagnet, oder auch eine von einem Strome durchflossene Spule ohne Eisenkern verwenden. Zwei bewegliche von Strömen durchflossene Spulen oder Solenoide drehen sich gegenseitig und ziehen sich dann

scheinbar an, ganz so wie dies zwei Magnetstäbe thun. Man hat hier magnetische Kraftwirkungen bei völliger Abwesenheit von Eisen und Stahl.

Zwei nebeneinander gestellte Stromkreise drehen sich stets so, dass ihre Flächen parallel stehen und von den

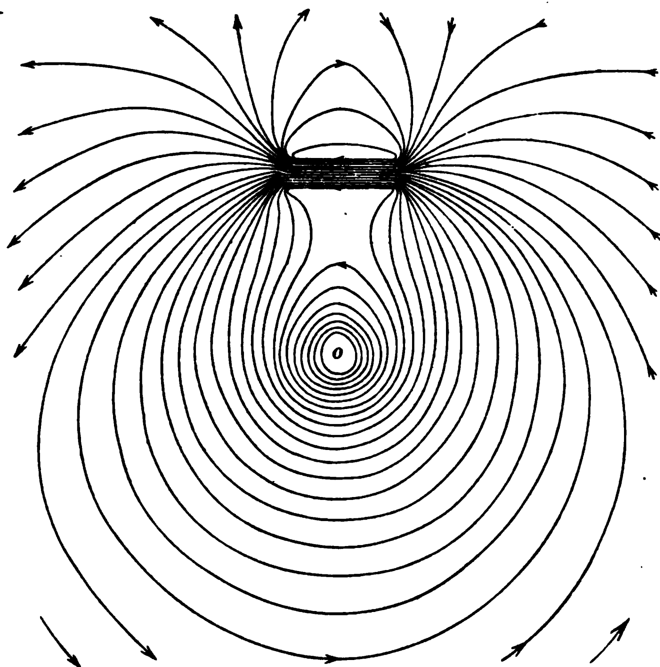


Fig. 123. Magnetnadel neben einem geradlinigen auf der Zeichnungsebene senkrechten Strom.

beiden Strömen in gleichem Sinne umflossen werden. Die in Fig. 106 § 192 dargestellte Stellung der beiden Stromkreise ist also jene, in welche sie von selbst zurückkehren, wenn sie drehbar sind. Die magnetische Strö-

mung, welche durch die Öffnungen der beiden Kreise fliesst und in Fig. 106 dargestellt ist, hat aber immer noch ein Verkürzungsstreben und zufolge desselben nähern sich die beiden Stromkreise. Zwei parallele Stromkreise, welche von gleichgerichteten Strömen durchflossen werden, ziehen sich scheinbar an. Werden sie in entgegengesetztem Umlaufssinn von ihren Strömen durchflossen, so stossen sie sich scheinbar ab.

SIEBENTE VORLESUNG.

Die magnetische Quirlströmung.

1. Der Quirl der magnetischen Strömung. Nachweis desselben.

§ 201. Wir führen nun den neuen höchst wichtigen (von Maxwell und Helmholtz herrührenden) Begriff des Quirls der magnetischen und elektrischen Strömung ein. Das Verständnis der folgenden Vorlesungen hängt durchaus davon ab, dass der Begriff des Quirls dem Leser geläufig ist und es sei demselben deshalb empfohlen, die sehr leichtfasslich gehaltenen Ausführungen in § 64 bis § 74 der Einleitung zunächst nochmals durchzulesen.

Die magnetische Strömung hat niemals Quellen oder Senken, sondern bildet immer Wirbel. Die Ursache jedes Wirbels ist der eigentliche Wirbelring oder Quirlring, welcher in der Mittellinie des Wirbels verläuft. Im Innern des Quirlringes hat die magnetische Strömung einen ganz anderen Charakter als ausserhalb desselben, sie hat nämlich im Innern des Quirlringes eine Rotation oder einen Quirl.

Um die Stellen aufzusuchen, wo die magnetische Strömung Quirl besitzt, benutzt man am einfachsten ein magnetisches Fähnchen (Fig. 36). Stellt sich dieses Fähnchen nach einigen Schwingungen in die Richtung der magnetischen Strömung ein, so ist an der betreffenden Stelle der Strömung kein Quirl vorhanden. In der ganzen Umgebung eines Magnetstabes ist also kein magnetischer Quirl vorhanden, denn wir haben in § 85 erfahren, dass dort ein magnetisches Fähnchen die Richtung der magnetischen Strömung anzeigt. Auch im Inneren eines Magnetstabes ist kein magnetischer Quirl vorhanden.

Dreht sich hingegen das magnetische Fähnchen ohne Aufhören in einem bestimmten Sinne, wenn auch mit ungleichförmiger Geschwindigkeit, so hat die magnetische Strömung an dieser Stelle einen Quirl, und es ist sicher, dass das Fähnchen inmitten eines magnetischen Wirbelringes steht. Sucht man nun noch jene Stellung des Stieles des Fähnchens auf, bei welcher an dieser Stelle der Strömung die fortwährende Rotation des Fähnchens sich am besten zeigt, dasselbe am raschesten rotiert, so giebt diese beste Richtung des Stieles die Richtung des an der untersuchten Stelle der Strömung vorhandenen Quirls an. Es ist dies immer die Richtung des Umfanges des magnetischen Wirbelfadens, in welchem sich das Fähnchen befindet.

Verschiebt man nun das Fähnchen in der Richtung seines Stieles weiter, so kommt man immer wieder an Stellen, wo die Strömung quirlt, wenn man dafür sorgt,

dass der Stiel immer so gerichtet ist, dass die Rotation des Fähnchens möglichst rasch ist. So durchläuft man den magnetischen Wirbelring seinem ganzen Umfange nach.

§ 202. Es ist keineswegs nötig, dass eine quirlende oder rotierende Strömung in krummen Stromlinien fliesst. Auch eine völlig geradlinige magnetische Strömung kann quirlen, wenn die gerade und parallel nebeneinander liegenden Stromfäden ungleiche Breite haben, wenn also die Strömung in benachbarten Stromlinien verschiedene Stärke hat. (Fig. 124.) Es ist leicht einzusehen, dass ein magnetisches Fähnchen *n s*, dessen Stiel *s* senkrecht zur Zeichnungsebene steht, in einer solchen Strömung sich nicht in die Richtung derselben ruhig einstellen kann, sondern fortwährend im Sinne des Pfeiles rotieren muss (im Sinne des Uhrzeigers), weil es hierbei in der oberen kräftigeren Strömung stärker angetrieben als von der unteren schwächeren Strömung zurückgehalten wird.

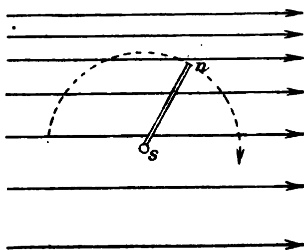


Fig. 124. Geradlinige quirlende magnetische Strömung.

§ 203. Wenn man ein magnetisches Fähnchen in die Umgebung eines Volta'schen Stromes bringt, so wird dasselbe abgelenkt, stellt sich aber nach einigen Schwingungen ruhig in die Richtung der magnetischen Strömung ein. Es ist also in der ganzen Umgebung eines Volta-schen Stromes kein magnetischer Quirl vorhanden, obgleich doch dort die magnetische Strömung in ring-

förmigen Bahnen fliesst, also einen Wirbel bildet. Die Ursache dieses Wirbels, der magnetische Quirl, ist nicht in der Umgebung des Stromleiters, sondern im Innern des Stromleiters gelegen, wie wir sogleich näher ausführen wollen.

Auch die seitliche Oberfläche eines Stahlmagnetes wird von magnetischen Quirlringen umflossen.

2. Der magnetische Quirl im Innern des Volta'schen Stromes.

§ 204. Um die magnetische Strömung im Innern eines Stromleiters zu untersuchen, müssen wir einen flüssigen Stromleiter wählen, denn in einen festen, metallischen Stromleiter können wir natürlich unser magnetisches Fähnchen nicht eintauchen. Wir verwenden als Stromleiter eine elektrolytisch leitende Flüssigkeit, z. B. eine wässerige Lösung von Kalilauge, oder noch besser metallisches Quecksilber.

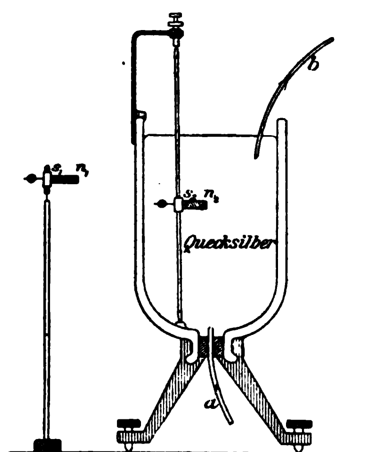


Fig. 125. Nachweis des magnetischen Quirls im Innern eines Volta'schen Stromes.

Wir senden einen Volta'schen Strom durch eine Säule von Quecksilber (Fig. 125), welche in einem Glasbecher

enthalten ist. Der Zuleitungsdraht *a*, welcher den Volta-schen Strom zuführt, tritt unten in den Glasbecher ein, der Strom durchfliesst dann die Quecksilbersäule von unten nach oben und wird endlich durch den oben in das Quecksilber getauchten Draht *b* abgeleitet. Um diesen Strom, also um das Quecksilber herum, fliesst aussen die magnetische Strömung in horizontalen Ringen. Ein ausserhalb des Stromleiters aufgestelltes Magnetfähnchen $n_1 s_1$ stellt sich in die Richtung dieser Strömung, also parallel zum Umfange des Glasbechers ein. Ausserhalb des Stromleiters quirlt also die magnetische Strömung nicht.

§ 205. Taucht man jedoch ein magnetisches Fähnchen $n_2 s_2$ (Fig. 125) so in das Innere des Quecksilbers, dass der Stiel desselben der Richtung des Volta'schen Stromes parallel, also vertikal steht, so dreht sich dieses Fähnchen kontinuierlich und desto rascher, je stärker der Volta'sche Strom ist, und zwar in der Richtung des Stromes betrachtet im Sinn des Uhrzeigers.

Kehrt man den Volta'schen Strom um, so dass er jetzt von oben nach unten durch die Quecksilbersäule fliesst, so schlägt das ausserhalb des Stromleiters angebrachte Fähnchen $n_1 s_1$ um und zeigt nach einigen Schwingungen in die entgegengesetzte Richtung wie vorhin. Das innerhalb des Stromleiters angebrachte Fähnchen $n_2 s_2$ stellt sich aber wieder nicht in die Richtung der magnetischen Strömung ein, sondern rotiert kontinuierlich, diesmal aber im entgegengesetzten Umlaufssinne, also in der Richtung des Stromes betrachtet wieder im Sinne des Uhrzeigers.

Im Innern eines Volta'schen Stromes ist überall ein magnetischer Quirl vorhanden, dessen Richtung der Richtung des elektrischen Stromes gleich ist, und dessen Stärke der Stärke der elektrischen Strömung proportional ist.

Hieraus folgt, dass jeder Volta'sche Strom ein magnetischer Quirlring ist und den in der vorigen Vorlesung beschriebenen magnetischen Wirbel erzeugen muss.

Man erkennt das Vorhandensein des magnetischen Quirls im Innern des Stromleiters auch an der abweichenden Verteilung der Stärke der magnetischen Strömung. Ausserhalb sowie innerhalb des Stromleiters fliesst die magnetische Strömung in ringförmigen Linien (Fig. 103 und Fig. 104). Die Stärke der Strömung ist aber an der Oberfläche des Stromleiters am grössten, dort sind die magnetischen Stromfäden am engsten. In der Axe des Stromleiters ist die magnetische Strömung Null, nach aussen nimmt sie an Stärke zu bis an die Oberfläche des Stromleiters, von da an weiter nach aussen nimmt sie aber an Stärke ab. Im Innern des Stromleiters ist überall ein Quirl von konstanter Stärke vorhanden. Auch in der Axe des Stromleiters, wo die magnetische Strömung ungemein schwach ist, ist der Quirl dieser Strömung ebenso stark wie überall im Stromleiter. Das magnetische Fähnchen dreht sich, wenn man seinen Stiel in die Axe des Stromleiters bringt, ebenso rasch wie überall innerhalb des Stromleiters.

3. Unipolare elektromagnetische Rotationsapparate.

§ 206. Das im Innern des Stromleiters kontinuierlich rotierende Magnetfähnchen stellt einen Elektromotor (§ 195) dar, welcher ohne Stromwender, bei konstantem Strome, sich dreht. Es giebt noch andere Formen solcher die direkte rotierende Wirkung des Volta'schen Stromes ausnützenden Elektromotoren, welche man nach der Form des sogleich zu beschreibenden Apparates auch Unipolarrotationsapparate nennt. Alle diese Rotationsapparate beruhen auf der Wirkung des magnetischen Quirls im Innern der durchströmten Leiter.

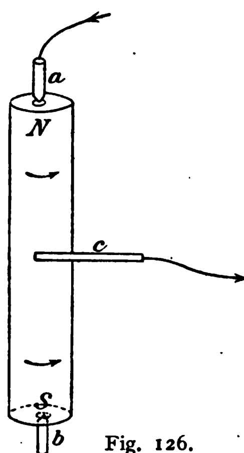


Fig. 126.
Unipolarrotationsapparat.

Ein Magnetstab *NS* Fig. 126 ist zwischen zwei in seine Endflächen eingesenkten Spitzen *a* und *b* um seine Längsaxe drehbar. Den Volta'schen Strom leitet man direkt durch eine Hälfte des Magnetes, er wird bei *a* zugeleitet und fliesst bei *c* durch einen an dem Magnete schleifenden Draht wieder ab. Sowie man den Volta'schen Strom schliesst, beginnt der Magnet um seine Axe zu rotieren. Leitet man den Strom bei *b* ein und bei *c* ab, so rotiert der Magnet im entgegengesetzten Sinne. Leitet man aber den Strom durch den ganzen Magnetstab (bei *a* ein und bei *b* ab), so rotiert der Magnet nicht.

4. Rasch veränderliche magnetische Quirl in Nichtleitern.

§ 207. Wir beginnen nun einen neuen Abschnitt unserer Vorlesungen, indem wir uns von den zeitlich unveränderlichen dauernden elektrischen und magnetischen Erscheinungen zur Betrachtung des Ablaufes rascher Änderungen der elektrischen und magnetischen Strömung wenden.

Nicht blos im Innern der Stromleiter, sondern auch ausserhalb derselben, z. B. in Luft, Öl oder Glas können magnetische Quirl auftreten, doch sind dieselben dann niemals dauernde Erscheinungen, sondern treten auf und verschwinden wieder, beides in ungemein kurzen Zeiten.

Die magnetischen Quirl in Nichtleitern treten dafür aber bei allen elektromagnetischen Veränderungen, also sehr häufig auf, und ihr Auftreten bildet eine der wichtigsten elektrischen Erscheinungen.

Ein magnetischer Quirl tritt überall in Nichtleitern auf, wo sich die elektrische Strömung rasch ändert, jedoch nur während der Zeit, in welcher die Abnahme oder Zunahme der elektrischen Strömung stattfindet. Er hat dieselbe Richtung wie die elektrische Strömung, während diese zunimmt, ist Null, wenn diese in beliebig grosser aber konstanter Stärke bestehen bleibt, und tritt in umgekehrter Richtung wieder auf, während die elektrische Strömung abnimmt. Der magnetische Quirl in Nichtleitern ist desto

stärker, je rascher sich die elektrische Strömung ändert.

§ 208. Man kann dieses Gesetz sich durch folgendes Experiment veranschaulichen. Es ist möglich, ein magnetisches Fähnchen mittels eines elektrischen Körpers, z. B. eines geriebenen Hartgummistabes, in eigentümlicher Weise zu beeinflussen.

Halten wir den geriebenen Stab *S* Fig. 127 hoch über das magnetische Fähnchen *n-s*, so beeinflusst die von demselben gegen das Fähnchen fliessende elektrische Strömung, welche die Richtung des Stieles des Fähnchens hat, dieses nicht. Nähern wir nun den Stab rasch dem Fähnchen, so wird während dieser Zeit die elektrische Strömung in der Umgebung des Fähnchens immer stärker, und es tritt ein magnetischer Quirl auf. Das magnetische Fähnchen dreht sich nun im Sinne des Pfeiles, und zwar desto rascher, je rascher wir den elektrischen Stab nähern. Halten wir diesen nun in der Nähe des Fähnchens fest, so ist die dasselbe umfliessende elektrische Strömung zwar stark, sie ändert sich aber nicht, es ist also kein magnetischer Quirl mehr vorhanden und das Fähnchen dreht sich nicht. Entfernen wir nun den elektrischen Stab rasch, so wird die elektrische Strömung in der Nähe des Fähnchens rasch schwächer und es tritt

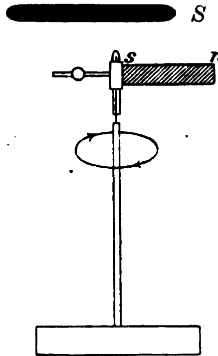


Fig. 127. Rotation eines magnetischen Fähnchens im veränderlichen elektrischen Felde.

ein magnetischer Quirl auf, welcher das Fähnchen, diesmal in umgekehrter Richtung wie vorhin, in Rotation versetzt.

Allerdings ist diese Wirkung viel zu schwach, um dieses Experiment in der beschriebenen Form mit deutlichem Erfolg ausführen zu können. In Wirklichkeit muss man sich viel empfindlicherer Methoden bedienen, um den magnetischen Quirl, welcher die veränderliche elektrische Strömung begleitet, nachweisen zu können, und diese Methoden wollen wir sogleich kennen lernen.

5. Entladung eines Kondensators durch ein Galvanometer.

§ 209. Wenn man zwei entgegengesetzt elektrisch geladene Kugeln + und — (Fig. 128) durch einen Draht

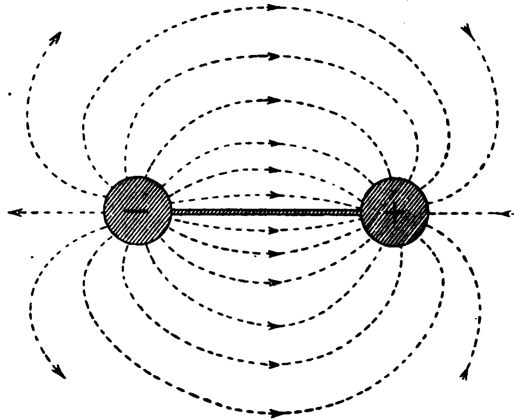


Fig. 128. Entladung zweier entgegengesetzt geladenen Kugeln durch einen Draht.

verbindet, so entladen sie sich. Die ganze zwischen ihnen übergehende elektrische Strömung verschwindet in

einer kaum messbar kurzen Zeit. Da somit überall in der Luft die elektrische Strömung ungemein rasch abnimmt, so tritt während dieser Zeit überall ein kräftiger magnetischer Quirl auf, allerdings auch nur für sehr kurze Zeit. Die magnetischen Quirlfäden haben ganz denselben Verlauf wie die elektrischen Stromfäden in Fig. 128, sie können aber nicht wie diese in der einen Kugel ihren Anfang, in der anderen Kugel ihr Ende nehmen, denn Quirlfäden müssen immer geschlossene Ringe bilden. Thatsächlich tritt in dem Augenblicke, in welchem die elektrische Strömung aufhört durch die Luft zu fliessen, in dem die Kugeln verbindenden Drahte eine heftige elektrische Strömung auf, womit auch das Auftreten eines magnetischen Quirls in dem Drahte verbunden ist, welcher so stark ist, dass man ihn leicht nachweisen kann. Alle magnetischen Quirlfäden, welche während der Entladung der Kugeln von der einen zur anderen übergehen, fliessen also dicht gedrängt durch den Draht zur ersten Kugel zurück.

In dem Drahte tritt während der Entladung für eine sehr kurze Zeit eine heftige elektrische Strömung und der dazu gehörige magnetische Quirl, also ein, wenn auch nur sehr kurz dauernder, so doch kräftiger Voltascher Strom, auf. Dieser Strom kann mittels eines empfindlichen Multiplikatorgalvanometers nachgewiesen werden. Der Draht, welcher die beiden geladenen Kugeln verbindet, kann nämlich beliebig lang und beliebig gekrümmt, also auch zu einer Multiplikatorspule zusammengerollt sein.

§ 210. Man führt dieses Experiment in folgender Gestalt aus. Man legt die beiden zu einem Multiplikator *M* (Fig. 129) mit 30000 Windungen führenden Zuleitungsdrähte, also die beiden Enden des zu der Multiplikatorspule zusammengerollten Drahtes an die beiden Belegungen einer geladenen Leydnerflasche *L* an. Fast in demselben Augenblicke verschwindet die elektrische Ladung der Leydnerflasche und die Magnetnadel in dem Multiplikatorgalvanometer macht sogleich einen grossen Ausschlag, welcher desto grösser ist, je grösser die Leydnerflasche ist und je stärker sie geladen war. Die Magnetnadel kehrt aber dann sogleich wieder in ihre Ruhelage zurück. Es ist endlich weder eine elektrische noch eine magnetische Strömung vorhanden, dafür aber der Multiplikatordraht ein wenig erwärmt worden.

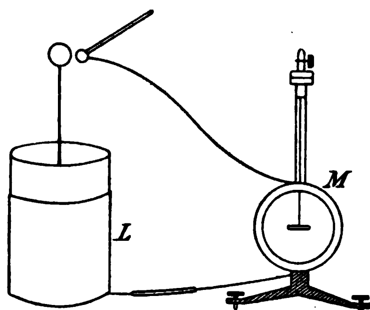


Fig. 129. Entladung einer Leydnerflasche durch einen Multiplikator.

Man kann sonach nicht zweifeln, dass die elektrische Strömung, ehe sie bei der Entladung (Mitteilung durch Berührung etc.) verschwindet, sich zunächst in magnetische Strömung und dann erst in Wärme verwandelt. Wir haben hiermit einen wesentlich tieferen Einblick in den Ablauf des Entladungsvorganges gewonnen und werden in dem Verständnis desselben noch weiter schreiten.

6. Ladung einer Leydnerbatterie durch ein Galvanometer.

§ 211. Es ist auch möglich, einen durch längere Zeit andauernden magnetischen Quirl in einem Nichtleiter zu erzeugen und nachzuweisen.

Wenn wir die beiden Pole einer Influenzmaschine *J* (Fig. 130) mit den beiden Belegungen einer Leydnerbatterie verbinden und nun die Influenzmaschine drehen,

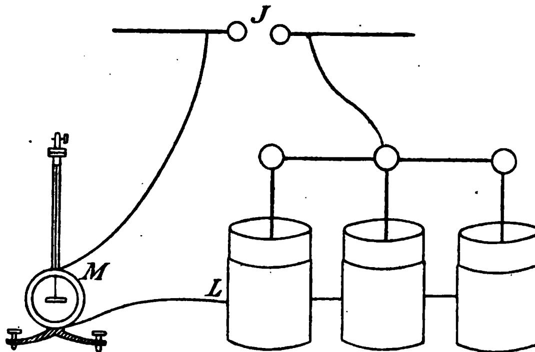


Fig. 130. Ladung einer Leydnerbatterie.

so wird die Leydnerbatterie *L* allmählich geladen. Es dauert dies eine beträchtliche Zeit. Während dieser Zeit wird die elektrische Strömung, welche senkrecht durch das Glas der Leydnerflaschen fliesst, immer stärker und es muss also nach § 207 während dieser ganzen Zeit ein gleichgerichteter magnetischer Quirl in dem Glase der Leydnerflaschen vorhanden sein. Die magnetischen Quirlfäden fliessen daher senkrecht durch das Glas von einer Belegung zu der anderen. Sie können aber nicht so kurze Stückchen sein, sondern müssen geschlossene

Ringe bilden. Alle Quirlfäden kommen durch den einen Zuleitungsdraht von der Influenzmaschine, breiten sich in den inneren Belegungen der Leydnerflaschen aus, fliessen senkrecht durch das Glas derselben, sammeln sich in dem anderen Zuleitungsdraht, fliessen dicht gedrängt in diesem Drahte zu der Influenzmaschine zurück, durch diese hindurch und wieder in den ersten Zuleitungsdraht.

In den Drähten muss die elektrische Strömung vorhanden sein, welche den magnetischen Quirl in allen Leitern begleitet.

Wir haben also in dem einen Draht einen dauernden Volta'schen Strom, welcher von der Influenzmaschine bis zu der inneren Belegung der Batterie fliesst, ohne sich fortzusetzen. In dem anderen Zuleitungsdraht haben wir einen Volta'schen Strom, welcher von der äusseren Belegung der Batterie bis zur Influenzmaschine fliesst, ohne sich fortzusetzen. In dem Glase der Leydnerflasche haben wir keinen Volta'schen Strom. Allerdings bestehen dauernde magnetische Quirlfäden, welche in geschlossenen Ringen von der Maschine durch den einen Draht, durch das Glas, durch den anderen Draht und durch die Maschine fliessen. Aber diese Quirlfäden sind in dem Glase der Leydnerflaschen nicht so wie in den Drähten von einer entsprechenden unveränderlichen elektrischen Strömung begleitet. In dem Glase der Leydnerflaschen ist vielmehr eine elektrische Strömung vorhanden, welche fortwährend zunimmt.

Halten wir jetzt die Maschine an, so verschwinden sofort alle magnetischen Quirlringe. In den Drähten ist

dann keine elektrische Strömung vorhanden. Doch ist die Leydnerbatterie stark geladen und also fliesst durch das Glas der Flaschen eine starke elektrische Strömung. Da diese aber unveränderlich ist, so wird sie in dem nichtleitenden Glase von keinem magnetischen Quirl begleitet.

Drehen wir jetzt die Influenzmaschine im umgekehrten Sinne, so entladet sich die Batterie allmählich. In den beiden Drähten fliessen jetzt Volta'sche Ströme von der umgekehrten Richtung wie vorhin. Es treten wieder dauernde magnetische Quirlringe auf, welche in umgekehrter Richtung wie vorhin von der Maschine zur äusseren Belegung, durch das Glas und von der inneren Belegung der Flaschen dicht gedrängt durch den anderen Zuleitungsdraht wieder zu der Maschine und durch diese fliessen. In den Drähten besteht eine dauernde elektrische Strömung, welche den dort vorhandenen magnetischen Quirlen an Stärke entspricht. In dem Glase der Leydnerflasche aber nicht so. Dort ist vielmehr eine elektrische Strömung vorhanden, welche fortwährend abnimmt.

§ *212*. Man kann das Vorhandensein der magnetischen Quirlringe leicht nachweisen, indem man in einen der Zuleitungsdrähte eine Multiplikatorspule *M* Fig. 130 mit 30000 Windungen einschaltet. Die Magnetnadel des Multiplikators zeigt einen dauernden Ausschlag, so lange man die Flaschen ladet, so lange man also die Influenzmaschine dreht. Sowie man die Influenzmaschine anhält, kehrt die Magnetnadel in ihre Ruhelage zurück.

[illegible] -enz-
[illegible] -mer-

[illegible] r-
[illegible] -ungs-
[illegible] -as
[illegible] -aden
[illegible] -nen
[illegible] -sen [illegible]
[illegible] -ss
[illegible]

[illegible]

Die magnetische Strömung hat nun niemals Quellen oder Senken. Die einzige Ursache der magnetischen Strömung sind ihre Quirlringe. Wir haben in dieser Vorlesung die Bedingungen kennen gelernt, unter welchen magnetische Quirlringe auftreten, also die tieferen Ursachen der magnetischen Strömung erkannt.

Magnetische Quirlringe finden sich erstens auf der ganzen seitlichen Oberfläche jedes Stahlmagnetes und sind die Ursachen der magnetischen Strömung desselben. Diese stahlmagnetischen Quirlringe sind allerdings ihrer eigentlichen Ursache nach noch nicht erforscht.

Magnetische Quirlfäden finden sich ferner in jedem leitenden Draht, in welchem eine elektrische Strömung vorhanden ist und sie sind desto stärker, je stärker die elektrische Strömung ist.

Magnetische Quirlfäden treten endlich auch in Nichtleitern auf, aber nur dann, wenn in diesen eine rasch veränderliche elektrische Strömung vorhanden ist. Die magnetischen Quirl in Nichtleitern sind desto stärker je rascher sich die elektrische Strömung ändert.

Wir werden in der nächsten Vorlesung erfahren, dass ein ganz ähnliches Gesetz auch das Entstehen elektrischer Quirl in Nichtleitern bestimmt. Diese treten mit desto grösserer Stärke auf, je rascher sich die magnetische Strömung an dem betreffenden Orte ändert.

ACHTE VORLESUNG.

Die elektrische Quirlströmung.

1. Faraday's erster Versuch.

§ 214. Der grösste Aufschwung, welchen die Elektrizitätslehre je erfahren hat, geht von folgender Idee Michael Faraday's aus. Es ist bekannt, dass jeder kräftige elektrische Strom von einem magnetischen

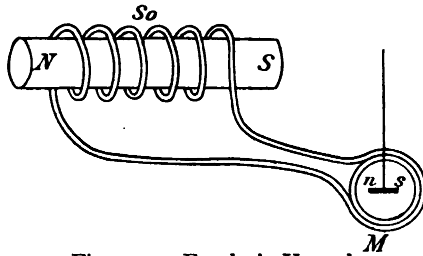


Fig. 131. Faraday's Versuch.

Wirbel umflossen wird. Faraday wollte nun versuchen, ob nicht auch umgekehrt jeder kräftige magnetische Strom von einem elektrischen Wirbel umkreist wird.

Faraday führte die beiden Enden eines zu einem Solenoid zusammengerollten Drahtes (*So* Fig. 131) zu

einem Multiplikator *M.* Die ganze Drahtleitung bildet also einen einzigen geschlossenen Ring. In das Solenoid wurde ein kräftiger Magnetstab *NS* gelegt. Derselbe wird der Länge nach von einem kräftigen magnetischen Strome durchflossen. Es war also zu hoffen, dass dieser Magnet von einem elektrischen Wirbel umkreist wird. Es wäre dann in dem Solenoiddraht eine elektrische Strömung vorhanden, und dieser Volta'sche Strom müsste die Multiplikatornadel *n s* ablenken. Dies findet jedoch nicht statt. Ein magnetischer Strom, mag er noch so kräftig sein, wird von keinem elektrischen Wirbel umflossen.

Als nun aber Faraday den Magnetstab aus dem Solenoid herauszog, zeigte die Multiplikatornadel einen kräftigen Ausschlag. Durch die Bewegung des Magnetes in dem Solenoid entsteht also in demselben ein Volta'scher Strom. Der in Bewegung befindliche Magnet wird demnach von einem elektrischen Wirbel umkreist.

Dort, wo sich die magnetische Strömung rasch ändert, treten elektrische Quirl auf, wie wir dies sogleich näher ausführen wollen.

2. Elektrische Quirl in Nichtleitern.

§ 215. Man kann sich dieses wichtige Faraday'sche Gesetz durch folgendes Experiment veranschaulichen. Es ist möglich, ein elektrisches Fähnchen (§ 109) mittels eines Magnetstabes in eigentümlicher Weise zu beeinflussen.

Halten wir den Magnetstab *NS* (Fig. 132) hoch über das elektrische Fähnchen *e*, so beeinflusst die von demselben gegen das Fähnchen fliessende magnetische Strömung, welche die Richtung des Stieles des Fähnchens hat, dieses nicht. Nähern wir nun den Magnet rasch dem Fähnchen, so wird während dieser Zeit die magnetische Strömung in der Umgebung des Fähnchens immer stärker und es tritt ein elektrischer Quirl auf. Das elektrische Fähnchen dreht sich zufolgedessen (von oben betrachtet) gegen den Sinn des Uhrzeigers und zwar desto rascher, je rascher wir den Magnet nähern. Halten wir diesen nun in der Nähe des Fähnchens fest, so ist die dasselbe umfliessende magnetische Strömung zwar stark, aber sie ändert sich nicht, es ist dann kein elektrischer Quirl mehr vorhanden und das Fähnchen dreht sich nicht. Entfernen wir nun den Magnet rasch, so wird die magnetische Strömung in der Nähe des Fähnchens rasch schwächer, es tritt ein elektrischer Quirl auf, welcher das Fähnchen diesmal in umgekehrter Richtung wie vorhin in Rotation versetzt.

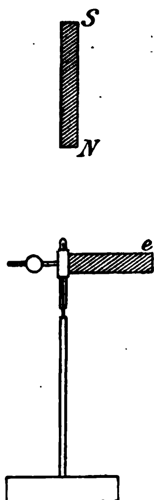


Fig. 132. Rotation eines elektrischen Fähnchens im veränderlichen magnetischen Felde.

Allerdings ist diese Wirkung viel zu schwach, um dieses Experiment in der beschriebenen Form mit deutlichem Erfolge ausführen zu können. In Wirklichkeit muss man sich der viel empfindlicheren Faraday'schen

Methode bedienen, um den elektrischen Quirl, welcher die veränderliche magnetische Strömung begleitet, nachweisen zu können.

3. Elektrische Induktion im veränderlichen magnetischen Felde.

§ 216. Am raschesten und ausgiebigsten lässt sich die magnetische Strömung verändern, welche von einem Elektromagnet *E* Fig. 133 ausgesendet wird. Verändert man die Stromstärke des Volta'schen Stromes („primären"

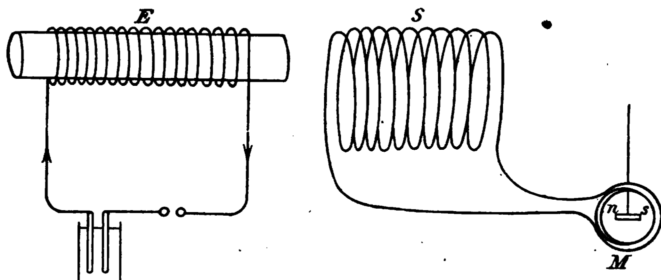


Fig. 133. Induktion durch Unterbrechung des primären Stromes.

Stromes), welcher durch die Spule des Elektromagnets fliesst, so ändert sich sofort die Stärke der magnetischen Strömung in der ganzen Umgebung des Elektromagnets. Steht diesem eine Stromspule *S* (sekundäre Spule) gegenüber, so ändert sich also auch die durch die Öffnung dieser Spule fliessende von dem Elektromagnet herrührende magnetische Strömung. Es treten hiermit elektrische Quirlfäden auf, welche der Länge nach durch die sekundäre Spule fliessen und einen elektrischen Wirbel bewirken, welcher die Spule umkreist. In dem

Drahte der sekundären Spule tritt also eine elektrische Strömung, ein Volta'scher Strom auf. Sind die Drahtenden der sekundären Spule mit den Enden einer Multiplikatorspule *M* (Fig. 133) verbunden, so erhält die Magnetnadel des Multiplikators einen Impuls, welcher jedoch nur so lange anhält, als man die Stärke des primären Elektromagneten ändert.

Schwächt man den primären Strom ab, so entsteht während dieser Zeit in der sekundären Spule ein Volta-scher Strom („induzierter" Strom), welcher dieselbe in dem gleichen Umlaufssinne durchläuft, wie der primäre Strom die primäre Spule. Verstärkt man den primären Strom, so wird in der sekundären Spule ein Strom induziert, welcher im entgegengesetzten Umlaufssinne fliesst.

Statt den primären Strom zu verstärken oder zu schwächen, kann man auch den Elektromagnet der sekundären Spule rasch nähern bezw. ihn von derselben entfernen. Auch hierdurch wird erreicht, dass sich die magnetische Strömung in der sekundären Spule rasch ändert.

Statt des Elektromagnetes kann man dann auch einen Stahlmagnet der sekundären Spule nähern oder ihn von derselben entfernen, und wird ebenfalls die induzierten Ströme erhalten.

Diese Induktionswirkung wird nur durch die Raschheit der Veränderung der magnetischen Strömung in der sekundären Spule bestimmt. Sie ist also am kräftigsten wenn man den primären Strom plötzlich ganz unterbricht, oder ihn plötzlich schliesst.

Der Eisenkern des Elektromagneten verstärkt die Wirkung, ist aber nicht wesentlich. Eine primäre Spule ohne Eisenkern, ja ein primärer Stromkreis beliebiger Form, hat bei jeder Bewegung oder bei jeder Veränderung der Stromstärke auf die sekundäre Spule oder auf einen sekundären Stromkreis beliebiger Form induzierende Wirkung.

4. Bewegte Leiter im unveränderlichen magnetischen Felde.

§ 217. Wenn man einen Magnet einer ruhenden (sekundären) Spule nähert, so wird in derselben ein Strom induziert. Nähert man umgekehrt die Spule dem ruhenden Magnet, so wird ganz derselbe Strom in der Spule induziert. So selbstverständlich diese Umkehrung des Experimentes ist, macht sie doch der modernen (Maxwell'schen) Theorie der elektromagnetischen Erscheinungen beträchtliche Schwierigkeiten, was als eine Schwäche dieser Theorie zu bezeichnen ist.

Wenn der Magnet ruht und die sekundäre Spule bewegt wird, so ändert sich die magnetische Strömung nirgends. Da nun aber doch elektrische Quirl auftreten, so können diese ihre Ursache nur in der Bewegung der Spule haben. Hiernach hätte die Bewegung eine direkte elektromagnetische Wirkung. Als mnemotechnische Regel kann man sich merken, dass in einem Drahtstück, welches senkrecht auf der unveränderlichen magnetischen Strömung steht und in einer Richtung bewegt wird, welche auf seiner eigenen Richtung und auf der Richtung

der magnetischen Strömung senkrecht steht, ein Strom induziert wird, dessen Stärke mit der Geschwindigkeit der Bewegung und der Stärke der magnetischen Strömung wächst. Doch ist diese Regel kein eigentliches Naturgesetz, sie gilt nur in den am häufigsten vorkommenden Fällen, trifft aber keineswegs immer zu.

Man verwendet die Induktionswirkung eines magnetischen Feldes auf eine bewegte Spule zur Messung der Stärke der magnetischen Strömung.

5. Beziehung der Faraday'schen Induktion zu den elektromagnetischen Kraftwirkungen.

§ 218. Wenn ein Volta'scher Strom einen Magnet in Bewegung setzt, so leistet er hierdurch eine Arbeit. Wenn der chemische Umsatz in dem Volta'schen Elemente, welches den Strom treibt, hierbei ungeändert bleibt, so kann doch nicht mehr die äquivalente Stromwärme in dem Stromkreise erzeugt werden, denn ein Teil der Wirkungsfähigkeit des Stromes wurde zur Bewegung des Magnetes verwendet.

Da nun aber die Stromwärme bestimmt wird durch die Stromstärke und durch die elektromotorische Kraft (§ 168), erstere aber nur von dem Umsatze in dem Elemente abhängt und sich also nicht geändert hat, so muss die elektromotorische Kraft eines Stromkreises, welcher einen Magnet in Bewegung setzt, sinken und kleiner sein als die Spannung des in diesen Stromkreis geschalteten Volta'schen Elementes.

Zu dem gleichen Schlusse kommt man aber auch aus

dem Faraday'schen Induktionsgesetze. Wenn man einen Magnet gegen einen Stromleiter bewegt, so induziert derselbe in dem letzteren stets eine elektrische Strömung, welche dem Strome entgegengesetzt ist, welcher in dem Stromleiter vorhanden sein müsste, damit derselbe den Magnet in diese Bewegung versetzen kann. Die durch Bewegungen induzierten Volta'schen Ströme widerstehen durch die von ihnen ausgehenden magnetischen Kräfte stets diesen Bewegungen. Diese induzierten elektromotorischen Kräfte sind es, welche der elektromotorischen Kraft eines Elementes entgegenwirken, wenn der Strom dieses Elementes einen Magnet bewegt.

§ 219. Man kann also aus jeder beobachteten Bewegung eines Magnetes durch einen Strom, oder eines Stromes durch einen Magnet, oder eines Stromes durch einen anderen Strom auf die Richtung und Grösse der durch diese Bewegung in den Stromleitern bewirkten Faraday'schen Induktion schliessen. Es muss also jeder Elektromotor (§ 195) umgekehrt auch ein Induktionsapparat sein. Sendet man den Strom eines Akkumulators durch den Elektromotor, so gerät derselbe in Bewegung. Setzt man unter Aufwendung von Arbeit diesen Elektromotor in dieselbe Bewegung und schliesst seinen Stromkreis ohne einen Akkumulator einzuschalten, so wird in diesem Kreise ein Strom induziert, welcher die umgekehrte Richtung, wie der Strom des Akkumulators hat und viel schwächer, aber (bei gleichmässiger Bewegung des Elektromotors) ebenso konstant und dauernd ist.

Jeder Elektromotor kann also als Stromerzeugungsmaschine oder Dynamomaschine verwendet werden.

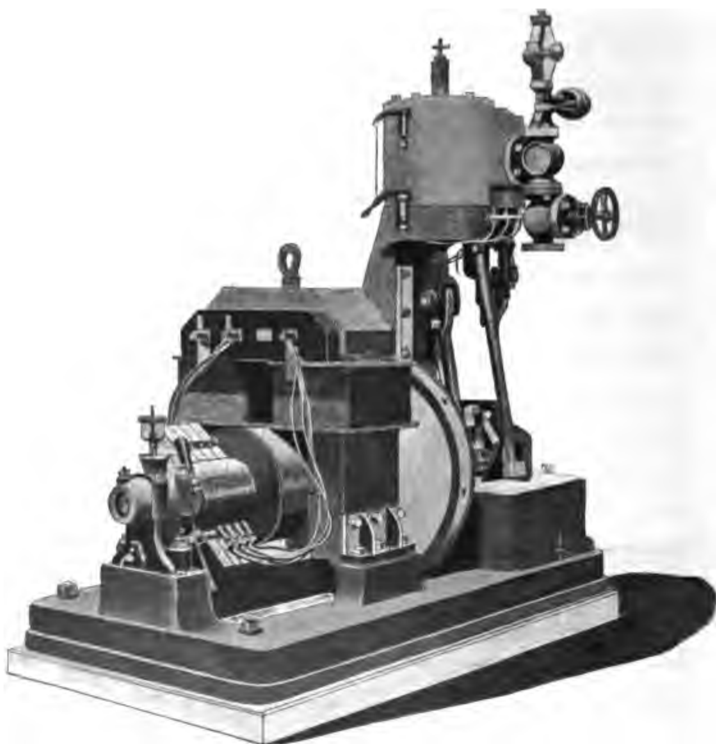


Fig. 134.
Dynamomaschine an eine schnelllaufende Dampfmaschine angeschlossen.

6. Unipolarinduktionsapparate.

§ 220. Die einfachste aller Strommaschinen ist das in Fig. 125 (§ 204) dargestellte im Innern eines Stromleiters rotierende Magnetfähnchen. Dasselbe rotiert kontinuierlich, wenn man den Strom eines Akkumulators

von unten nach oben durch die Quecksilbersäule schickt. Schaltet man statt des Akkumulators eine Multiplikatorspule (mit wenig Drahtwindungen) in diesen Stromkreis und setzt man nun das Magnetfähnchen mechanisch in dieselbe Rotation, so induziert dasselbe in dem Stromkreis einen Strom, welcher in dem Quecksilber von oben nach unten fliesst, aber freilich sehr schwach ist.

Wenn man den Magnet des Unipolarrotationsapparates (Fig. 126 § 206) mechanisch in rasche Rotation versetzt und die Ableitungen *a* und *c* durch eine Multiplikatorspule verbindet, so zeigt dieser Multiplikator einen induzierten Strom an, welcher viel schwächer ist und die umgekehrte Richtung hat, wie ein Volta'scher Strom, welchen man mittels der Zuleitungen *a* und *c* durch eine Hälfte des Magnetes senden müsste, damit derselbe in die gleiche Rotation gerät.

7. Dynamomaschinen. Kraftübertragung. Telephon.

§ *221.* Technisch sehr wichtig ist die Umkehrung der grossen Elektromotoren mit Elektromagneteten (Fig. 115 § 195) in Dynamomaschinen (Fig. 134). Sendet man durch die Spulen eines solchen Elektromotors einen kräftigen Volta'schen Strom, so werden die Elektromagnete desselben magnetisch und setzen den Elektromotor in Rotation, so dass derselbe Arbeit leisten kann. Schliesst man hingegen den Stromkreis eines solchen Elektromotors und setzt denselben durch Aufwendung beträchtlicher Arbeit (einer Dampfmaschine oder einer Wasserturbine) in rasche Rotation, so läuft derselbe eine kurze Zeit

leicht, und liefert nur einen schwachen Induktionsstrom. Es sind ja die Eisenkerne der Elektromagnete anfangs fast unmagnetisch und die Induktionswirkung kann also nur unbedeutend sein. Aber eben der anfänglich induzierte schwache Strom verstärkt die Elektromagnete, wodurch auch wieder die Induktion sich verstärkt und die Elektromagnete abermals stärker werden, so dass sie nach einigen Minuten ihre volle Kraft haben und die Dynamomaschine einen mächtigen Strom liefert und eine grosse Arbeit verbraucht (Dynamoelektrisches Prinzip von Werner Siemens).

Man baut Dynamomaschinen, welche durch 1000 pferdekräftige Dampfmaschinen getrieben werden und Ströme bis zu 5000 Volt Spannung und 150 Ampère Stromstärke oder von 200 Volt Spannung und 3600 Ampère Stromstärke liefern.

Alle Volta'schen Ströme, welche gegenwärtig in der Technik verwendet werden, werden durch Induktionsmaschinen geliefert. Die Volta'schen Elemente werden zur Stromerzeugung fast nur mehr im Telegraphenbetriebe verwendet, und auch hier schon allmählich durch Induktionsapparate verdrängt. Die Akkumulatoren werden jedoch vielfach zur Aufspeicherung des Stromes verwendet, aber immer mit Dynamomaschinen geladen.

§ 222. Besitzt die Strommaschine keinen Stromwender, so liefert sie keinen kontinuierlichen Strom, sondern ihr Strom ändert in regelmässigem sehr raschem Rhythmus seine Richtung (Wechselstrom). Diese Wechselstrommaschinen (Fig. 135) liefern einen Strom, welcher

für manche Zwecke, besonders für die elektrische Beleuchtung, besser verwendbar ist als der konstante Strom.

Man baut jetzt Wechselstrommaschinen, welche einen in drei Leitungsdrähten zum Orte seines Verbrauches geleiteten Strom (Dreiphasenstrom oder Drehstrom) liefern. Die Wechselströme in diesen drei Drähten wechseln nicht gleichzeitig, sondern im Dreitakt.

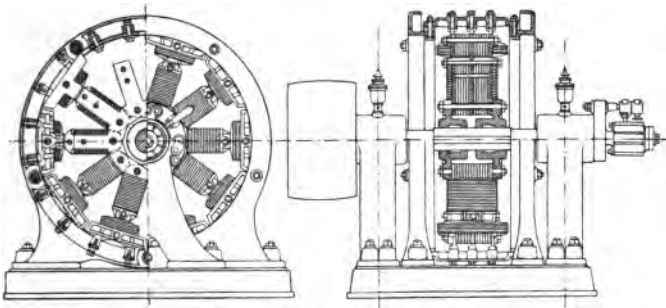


Fig. 135. Wechselstrommaschine.

§ 223. Man kann den durch eine Dynamomaschine oder Wechselstrommaschine gelieferten Strom auf kilometerweite Entfernung fortleiten und mit Hilfe desselben dann einen Elektromotor treiben. Diese elektrische Kraftübertragung verwendet man, um die Kraft eines Wasserfalles zum Betriebe einer weit entfernten Fabrik zu verwerten. Der Wasserfall treibt die stromliefernde Dynamomaschine, während die Fabrik durch den Elektromotor angetrieben wird.

In den Städten wünscht man die Trambahn nicht durch Dampflokomotiven zu treiben. Man erzeugt deshalb mittels grosser feststehender Dampfmaschinen und

Dynamomaschinen einen Strom, welcher durch die Oberleitungen den Trambahnwagen zugeführt wird, und welcher die an den Wagenachsen angebrachten Elektromotoren treibt.

§ 224. Eine besondere Form der elektrischen Kraftübertragung ist das telephonische Sprechen. Es wird dabei die Kraft der Luftschwingungen, welche beim Sprechen entstehen, zur Erzeugung eines schwachen Wechselstromes, welcher den Rhythmus der Sprechtöne hat, verwendet. Dieser fliesst durch die Telephonleitung und setzt an der Empfangsstation das Hörtelephon in gleichtönende Schwingungen.

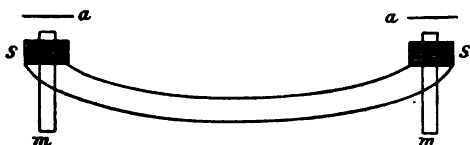


Fig. 136. Telephonische Übertragung.

Das Sprechtelephon sowohl wie das Hörtelephon bestehen aus einem Magnetstab *m*, welcher eine kleine Drahtspule *S* trägt. Diese beiden Spulen sind durch die Telephonleitung verbunden. Über den Magneten stehen die an ihrem Rand festgehaltenen dünnen Eisenplättchen *a*, welche durch Schallwellen in Schwingungen geraten, und andererseits, wenn sie schwingen, Schallwellen aussenden. Spricht man in das eine Telephon, so stört die Schwingung des Blättchens periodisch die magnetische Strömung des Magnets. Hierdurch wird in der Spule ein Wechselstrom induziert, welcher auch durch die Spule des Hör-

telephons fliesst und den Magnet desselben periodisch verstärkt und schwächt, so dass er sein Blättchen periodisch stärker anzieht und so in Schwingungen versetzt. Da dieses Empfangstelephon aber zu leise spricht, verwendet man es nur als Mikrophon. Die Schwingungen seines Blättchens werden nur benützt, um einen stärkeren konstanten Volta'schen Strom, welchen ein Volta'sches Element liefert, zu unterbrechen, und dieser periodisch unterbrochene Strom treibt dann erst das Hörtelephon.

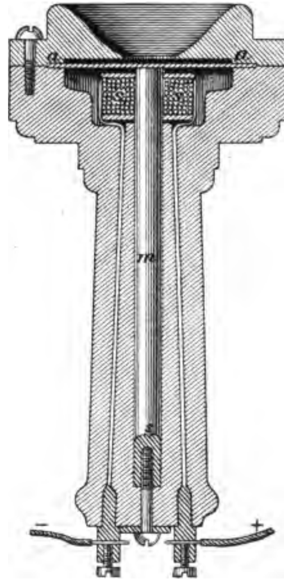


Fig. 137. Telephon.

Wenn zwei verschiedene Telephonleitungen auf weite Strecken nebeneinander verlaufen, so induziert der Telephonstrom in der einen Leitung einen ähnlichen nur schwächeren Wechselstrom in der anderen Leitung. Es findet dann das lästige Überhören von fremden Gesprächen statt. Dasselbe wird beseitigt, wenn man die beiden Leitungsdrähte, welche die Telephonspulen verbinden, nahe aneinander führt. In diesen fliesst der Telephonstrom immer in entgegengesetzter Richtung. Solche bifilare Telephonleitungen üben keine Induktion auf nebenherlaufende Leitungen aus und erfahren auch selbst keine merkliche Induktionswirkung.

8. Stromstärke und Spannung des induzierten Stromes.

§ 225. Die induzierte Strommenge, welche in dem Schliessungskreise der sekundären Spule (§ 216) auftritt, hängt von dem Widerstande des sekundären Stromkreises ab. Die motorische Kraft der induzierten elektrischen Wirbel hängt jedoch nur von der Raschheit der Änderung der magnetischen Strommenge ab, welche durch die Öffnung des sekundären Stromkreises fliesst.

Stellen wir mehrere sekundäre Stromringe dicht neben einander, so wird in jedem derselben die gleiche elektromotorische Kraft induziert, nämlich die elektromotorische Kraft sämtlicher elektrischer Quirlfäden, welche zufolge der Veränderung der magnetischen Strömung auftreten und durch die Öffnung der Stromringe fliessen. In einer Spule von 100 Windungen wird die 100fache elektromotorische Kraft induziert, wie in einer einfachen Windung.

Um eine möglichst hohe induzierte elektromotorische Kraft zu erhalten verwendet man sekundäre Spulen von möglichst vielen Windungen. Man wird diese Spulen immer wählen, wenn dieselben durch einen hohen Widerstand geschlossen werden sollen.

9. Die Transformatoren.

§ 226. Um eine möglichst hohe induzierte elektromotorische Kraft zu erhalten, verwendet man zur Erzeugung der magnetischen Strömung einen kräftigen Elektromagnet E_1 E_2 (Fig. 138), welcher aus einem Bündel

Eisendrähte besteht, die in der primären Spule S_1 von ungefähr 100 Windungen eines dicken Drahtes stecken.

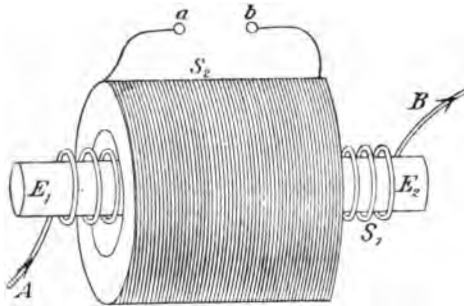


Fig. 138. Ruhmkorff'scher Induktionsapparat (schematisch).

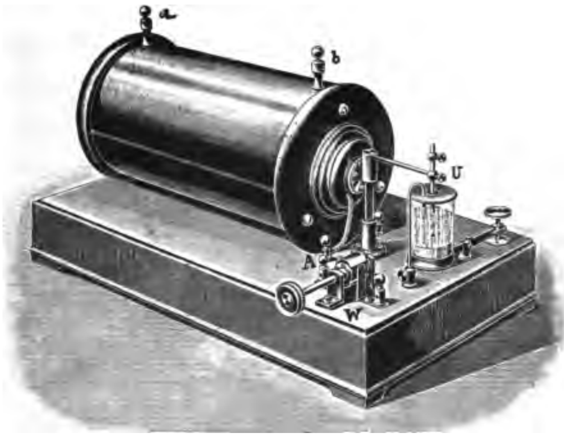


Fig. 139. Ruhmkorff'scher Induktor.
U automatischer Stromunterbrecher, *W* Stromwender.

Die sekundäre Spule S_2 ist direkt über diesen Elektromagnet gesteckt. Infolgedessen geht die ganze durch den Elektromagnet fliessende magnetische Strömung auch

durch die Öffnung der sekundären Spule. Unterbricht man den primären Strom plötzlich, so erhält man eine kräftige Induktionswirkung in der sekundären Spule. Diese enthält bis 100000 Windungen eines dünnen (mit Seide umsponnenen und mit Schellack überzogenen) Drahtes. Die in dieser Spule induzierte elektromotorische Kraft kann 30000 Volt erreichen, so dass man zwischen den Enden *a*, *b* des Drahtes der sekundären Spule bis 4 cm lange Funken erhalten kann.

§ 227. Der Ruhmkorff'sche Induktor wirkt jedoch noch bedeutend besser, und giebt 30—50 cm lange Funken. Diese grosse Verbesserung der Wirksamkeit des beschriebenen Induktionsapparates wird merkwürdigerweise erreicht durch einen Kondensator von sehr grosser Durchlässigkeit, dessen beide Belegungen mit den Enden der primären Spule verbunden sind. Dieser Kondensator ist gewöhnlich in dem Untersatze des Induktors verborgen und besteht aus einem vielfach gefalteten, viele Quadratmeter grossen Streifen von paraffiniertem Papier, welches beiderseits mit Stanniol belegt ist.

Die Ursache der hohen Wirksamkeit dieses Kondensators können wir erst in der nächsten Vorlesung verstehen lernen.

§ 228. Ein solcher Induktor verwandelt den primären Strom, dessen Strommenge gross, dessen elektromotorische Kraft aber gering ist, in den sekundären Strom, dessen Strommenge wohl klein, dessen elektromotorische Kraft aber sehr gross ist. Diesen Vorgang bezeichnet man in der Technik als Transformation eines Stromes.

Eine höhere technische Wichtigkeit haben die Transformatoren, welche das umgekehrte leisten, nämlich einen Wechselstrom von hoher elektromotorischer Kraft aber geringer Strommenge in einen Strom von niedrigerer Spannung aber grösserer Strommenge verwandeln. In diesen Transformatoren hat die primäre Spule zahlreiche, die sekundäre Spule aber wenig Windungen.

Solche Transformatoren sind in allen Stadtteilen der Grossstädte gleichmässig verteilt aufgestellt. Sie verwandeln den Strom, welcher von den zentralen Elektrizitätswerken oft auf weite Entfernungen hergeleitet wird, und welcher 3000 Volt Spannung hat in einen Strom von höherer Stromstärke aber von nur 110 Volt Spannung. Dieser Strom dient zu Beleuchtungszwecken und zum Betriebe von Elektromotoren und Trambahnen. Er ist nicht so lebensgefährlich wie der hochgespannte Strom. Dieser hingegen ist geeigneter auf weite Strecken fortgeleitet zu werden, weil seine Stromstärke verhältnismässig gering ist, und er deshalb in den Leitungsdrähten nicht sehr viel Stromwärme produziert, was mit einer bedeutenden Ersparnis verbunden ist. Man hat zu dieser Kraftübertragung sogar Ströme, welche 25000 Volt Spannung haben, verwendet. Diese lassen sich ohne allzugrosse Verluste mehr als hundert Kilometer weit fortleiten.

NEUNTE VORLESUNG.

Die elektromagnetischen Schwingungen.

1. Grundgesetze der elektromagnetischen Änderungen.

§ 229. Wir haben in den beiden vorhergehenden Vorlesungen die beiden Faraday-Maxwell'schen Grundgesetze des Ablaufes rascher Veränderungen der elektrischen und magnetischen Strömungen in Nichtleitern kennen gelernt. Dieselben lauten:

1. Dort und nur dort, wo sich die elektrische Strömung rasch ändert, tritt ein starker magnetischer Quirl auf.

2. Dort und nur dort, wo sich die magnetische Strömung rasch ändert, tritt ein starker elektrischer Quirl auf.

Man ersieht hieraus sofort, dass es nicht möglich ist, dass elektrische Quirl und magnetische Quirl in Nichtleitern ruhig bestehen bleiben. Ihr Vorhandensein bewirkt immer rasche elektromagnetische Änderungen oder setzt solche voraus.

Die elektrischen Quirlfäden und die magnetischen Quirlfäden in Nichtleitern bilden stets Ringe, welche kettenförmig verschlungen sind, wie dies Fig. 140 schematisch darstellt. Die Form dieser Quirlringe kann sehr verschieden sein. Da nun auch die magnetischen Stromlinien den magnetischen Quirlring umkreisen, haben sie ungefähr denselben Verlauf wie die elektrischen Quirl-

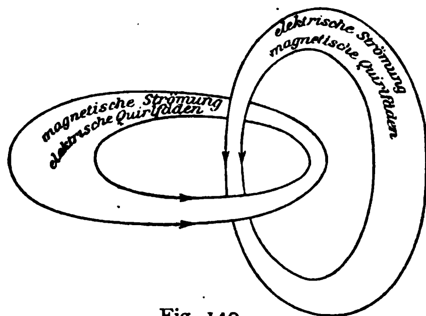


Fig. 140.
Zusammenhang der elektrischen und magnetischen Wirbel.

fäden und ebenso haben die elektrischen Stromlinien ungefähr denselben Verlauf wie die magnetischen Quirlfäden.

Je stärker nun der magnetische Wirbel ist, desto rascher ändert sich der mit ihm kettenförmig zusammenhängende elektrische Wirbel, und je stärker dieser ist, desto rascher ändert sich der magnetische Wirbel.

Welcher Vorgang resultiert nun aus dieser gegenseitigen Änderung der beiden Wirbel?

2. Allgemeines über Schwingungsvorgänge.

§ 230. Eine derartige gegenseitige Änderung zweier Erscheinungen ist dem Physiker nichts ungewohntes. Es

kommt in der Natur sehr häufig vor, dass zwei Erscheinungen gegenseitig so von einander abhängen, dass die eine desto *intensiver* ist, je *rascher* sich die andere ändert *und umgekehrt*. In allen diesen Fällen ist ein Ruhezustand unmöglich, so lange eine der beiden Erscheinungen vorhanden ist. Um zu erkennen, welchen Ablauf diese gegenseitigen Änderungen der beiden Er-

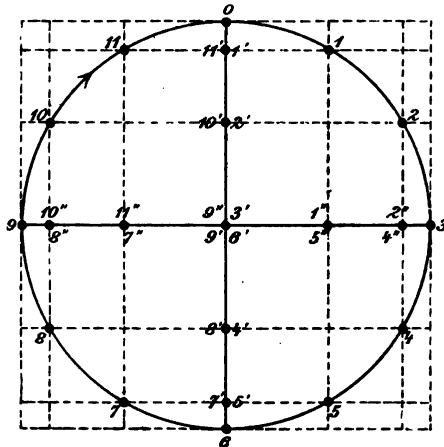


Fig. 141. Zerlegung der Kreisbewegung in zwei Schwingungen.

scheinungen nehmen müssen, betrachten wir am einfachsten einen ähnlichen Zusammenhang zweier *geometrischer* Erscheinungen.

Wir denken uns einen Körper gleichmässig in einem Kreise bewegt (Fig. 141). Derselbe steht bald hoch bald tief, es ändert sich also seine *Höhe*. Ferner steht er bald rechts bald links, es ändert sich also sein *Abstand* von der vertikalen Mittellinie. Zwischen diesen beiden

Erscheinungen, der Höhe und dem horizontalen Abstand besteht nun, während der Körper seine Kreisbewegung ausführt, die Beziehung, dass 1. wenn er möglichst hoch oder tief ist, also wenn sein vertikaler Abstand von der horizontalen Mittellinie möglichst gross ist, sich sein horizontaler Abstand rasch ändert, und 2. wenn der Körper möglichst weit rechts oder links ist, wenn also sein horizontaler Abstand gross ist, sich sein vertikaler Abstand rasch ändert.

Das Resultat dieser Beziehung zwischen dem horizontalen und vertikalen Abstand ist, dass beide sich periodisch ändern und also eine Schwingung ausführen. Immer wenn der vertikale Abstand am grössten ist, ist der horizontale Abstand am kleinsten und umgekehrt.

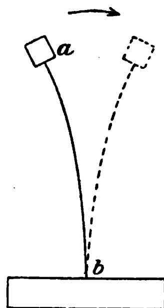


Fig. 142.
Schwingende Feder.

§ 231. Nun werden wir auch ähnliche physikalische Prozesse verstehen, z. B. die Bewegung eines gespannten federnden Stahlbandes (*a b* Fig. 142), welches bei *b* festgeklemmt ist und bei *a* einen schweren Körper trägt. Man hat hier zwei Erscheinungen: die Biegung der Feder und die Geschwindigkeit des Körpers *a*. Ruhe findet nur statt, wenn weder eine Biegung noch eine Geschwindigkeit vorhanden ist.

Je stärker die Spannung der Feder ist, desto rascher ändert sie die Geschwindigkeit des Körpers, während sie auf denselben keine Wirkung ausübt, wenn sie ungespannt ist.

Je grösser die Geschwindigkeit des Körpers ist, desto rascher ändert sich die Biegung der Feder.

Wir haben also hier wieder diesen gegenseitigen Zusammenhang. Das Resultat desselben muss nach § 230 sein, dass sowohl die Biegung der Feder, als die Geschwindigkeit des Körpers sich periodisch ändern. Immer, wenn die Biegung am grössten ist, ist die Geschwindigkeit am kleinsten und umgekehrt. Die Feder muss Schwingungen ausführen, wie dies thatsächlich zutrifft.

§ 232. Für alle Schwingungsvorgänge ist die Zeit, welche jede einzelne Schwingung zu ihrer Vollendung braucht (Schwingungsdauer), sehr charakteristisch und dieselbe hängt in einfacher Weise von den beiden Grundgesetzen ab, welche den Schwingungsvorgang beherrschen. In jenen Fällen, in welchen sehr rasche Änderungen der einen Erscheinung nötig sind, damit die zweite Erscheinung merkliche Stärke hat, in welchen also eine geringe Stärke der einen Erscheinung schon sehr rasche Änderungen der anderen bewirkt, ist die Dauer der auftretenden Schwingungen eine sehr kurze:

Wenn z. B. die Feder (Fig. 142) sehr stark ist, so bewirkt schon eine geringe Biegung derselben eine sehr rasche Änderung der Geschwindigkeit des Körpers *a*. Diese Feder hat also eine sehr kurze Schwingungsdauer.

§ 233. Wenn nicht, wie dies immer der Fall ist, Nebenwirkungen eintreten würden, so würden alle Schwingungsvorgänge ohne Ende sich fortsetzen. Es zerstreut

sich aber immer die Energie der Schwingung in der Umgebung oder sie verwandelt sich in Wärme. Infolgedessen werden die Schwingungen immer kleiner und hören endlich ganz auf. Diese Dämpfung der Schwingungen lässt jedoch die Schwingungsdauer derselben ziemlich unverändert. Die kleineren Schwingungen zu Ende des Schwingungsvorganges (der Oscillation) haben dieselbe Schwingungsdauer wie die grösseren Schwingungen zu Anfang der Oscillation.

3. Elektromagnetische Schwingungen.

§ 234. Die gegenseitige Änderung der elektrischen und magnetischen Quirlströmungen wird nach dem vorigen ein Schwingungsvorgang sein.

Sowohl der elektrische als der magnetische Wirbel ändern sich periodisch. Immer wenn der magnetische Wirbel am stärksten ist, ist der elektrische Wirbel am schwächsten, ändert sich aber gerade dann am raschesten und umgekehrt. Beide Wirbel hängen immer kettenartig zusammen. (Fig. 140.)

Die Tabelle auf Seite 286 giebt diese Verhältnisse für acht Augenblicke oder Phasen der Schwingung an.

Man überzeuge sich zunächst, dass jede Zeile dieser Tabelle die beiden Grundgesetze § 229 erfüllt. Wenn der magnetische Wirbel stark ist, ändert sich der elektrische Wirbel rasch und umgekehrt.

Dann beachte man irgend eine Colonne der Tabelle. In jeder spricht sich der Charakter des ganzen Vorganges als eines periodischen oder Schwingungsvorganges aus.

Die letzte Zeile der Tabelle ist der ersten Zeile gleich. Nach Ablauf dieser ersten Schwingung ist also der An-

Phase	Magnetischer Wirbel			Elektrischer Wirbel		
	Umlaufs-richtung	Stärke	Änderung	Umlaufs-richtung	Stärke	Änderung
Beginn der Schwingung		stark	langsam		schwach	rasch
nach $^1/_8$ Schwingung .		mittel	rascher		mittel	langsamer
nach $^1/_4$ Schwingung .		schwach	rasch		stark	langsam
nach $^3/_8$ Schwingung .		mittel	langsamer		mittel	rascher
nach $^1/_2$ Schwingung .		stark	langsam		schwach	rasch
nach $^5/_8$ Schwingung .		mittel	rascher		mittel	langsamer
nach $^3/_4$ Schwingung .		schwach	rasch		stark	langsam
nach $^7/_8$ Schwingung .		mittel	langsamer		mittel	rascher
nach 1 Schwingung . .		stark	langsam		schwach	rasch

fangszustand wieder hergestellt und es folgt eine und noch viele ganz gleiche Schwingungen.

§ 235. Da eine enorm rasche Änderung des magnetischen Wirbels nötig ist, damit der elektrische Wirbel in beträchtlicher Stärke auftrete (und umgekehrt), so laufen die elektromagnetischen Schwingungen in ungemein kurzer Zeit ab. Die langsamsten elektromagnetischen Schwingungen, welche man erzeugen kann, dauern nur $^{1}/_{20000}$ Sekunde. Die mit den gewöhnlichen Mitteln zu erhaltenden elektromagnetischen Schwingungen sind jedoch noch viel rascher. Im Zeitraum einer Sekunde können 1 Million bis 100 Millionen dieser Schwingungen einander folgen.

4. Elektromagnetische Schwingung eines Kondensators durch seinen Schliessungsdraht.

§ 236. Die elektromagnetischen Schwingungen, deren allgemeinen Typus wir eben beschrieben haben, sind nicht etwa eine seltene Erscheinung, sondern der gewöhnlichste elektrische Vorgang. Bei jeder Änderung eines Stromes oder einer elektrischen Ladung treten sie auf, jeder elektrische Funke ruft sie hervor.

Die wichtigste Form der elektromagnetischen Schwingung tritt auf, wenn man einen geladenen Kondensator oder eine Leydnerflasche durch einen Schliessungsdraht ausladet. (Vergl. § 209.) In dem Drahte tritt ein heftiger Volta'scher Strom und der dazugehörige magnetische Quirl auf. Während also die elektrische Strömung in dem Glase der Leydnerflasche immer schwächer wird, tritt ein magnetischer Wirbel auf, welcher den Schliessungsdraht umkreist. Gerade wenn die Leydnerflasche

ganz unelektrisch ist, hat dieser magnetische Wirbel seine grösste Stärke erreicht. Es hat sich also bei diesem Vorgang, welcher eine Viertelschwingung darstellt, die elektrische Ladung des Kondensators in einen magnetischen Wirbel verwandelt. Dieser hat jedoch ebenfalls keinen Bestand. Er verschwindet und statt seiner tritt eine elektrische Ringströmung auf, welche durch den Schliessungsdraht und durch das Glas des Kondensators fliesst. In diesem entsteht also wieder eine elektrische Strömung. Der Kondensator ladet sich wieder, aber umgekehrt wie anfangs. Endlich nach der zweiten Viertelschwingung ist der magnetische Wirbel ganz verschwunden und nur eine elektrische Ringströmung vorhanden. Der Kondensator ist dann ebenso stark aber umgekehrt wie anfangs geladen. Während der zweiten Halbschwingung entladet er sich wieder völlig, wobei ein magnetischer Wirbel auftritt, welcher den Schliessungsdraht umkreist und zwar in umgekehrter Richtung wie vorhin. Auch dieser verschwindet wieder und der Kondensator ist zum Schluss der ersten Schwingung fast so hoch geladen wie anfangs.

So folgen sich viele Schwingungen. Da aber der Wechselstrom, welcher in dem Schliessungskreise auftritt, diesen ein wenig erwärmt, verlieren die Schwingungen an Energie und hören endlich auf. Dann erst ist der Kondensator wirklich völlig entladen.

Diese Dämpfung ist oft so stark, dass schon die zweite Schwingung des Kondensators kaum mehr zu Stande kommt. Gewöhnlich ist aber noch die zwanzigste Schwingung deutlich und man kann die dämpfenden

Nebenwirkungen so herabmindern, dass der Kondensator 1000 bis 10000 deutliche Schwingungen ausführt, ehe er entladen ist.

§ 237. Die Dauer jeder Schwingung eines Kondensators ist desto kürzer, je kleiner die Durchlässigkeit (Kapazität) desselben ist und je kürzer der Schliessungsdraht ist. Wenn der Draht sehr lang ist, so genügt schon eine langsame Änderung des ausgedehnten magnetischen Wirbels, welcher ihn umgiebt, um einen ausgiebigen elektrischen Wirbel zu erzeugen und deshalb sind die Schwingungen dann langsam. Rollt man den Schliessungskreis zu einer Spule zusammen, so werden die Schwingungen noch langsamer, weil dann der magnetische Wirbel noch ausgiebiger wirkt.

Eine grosse Leydnerflasche entlädt sich durch eine Drahtspule von 30000 Windungen mit einer Schwingungsdauer von $^1/_{50000}$ Sekunde.

Ein kleiner Plattenkondensator entlädt sich durch einen Schliessungsdraht von nur 1 m Länge mit einer Schwingungsdauer von einer Zehnmillionstel Sekunde.

§ 238. Noch kürzere Schwingungsdauer haben die geradlinigen Oscillatoren. Es bestehen dieselben aus zwei entgegengesetzt geladenen Metallkugeln, welche durch einen geradlinigen Draht verbunden werden (Fig. 128, § 209). In dem Drahte tritt ein Wechselstrom auf, welcher 1·00 Millionen und noch mehr Schwingungen in der Sekunde ausführt. Der entsprechend wechselnde magnetische Wirbel dieses Stromes umkreist den Draht. Die Kugeln sind in den gleichen kurzen Perioden abwechselnd + und —

geladen. Zwischen ihnen geht die elektrische Strömung durch die Luft über und fliesst dann der Länge nach durch den Draht. Alle elektrischen Stromfäden sind also ringförmig geschlossen und hängen kettenförmig mit den magnetischen Stromfäden zusammen. Der elektrische und magnetische Wirbel wechseln mit einander ab.

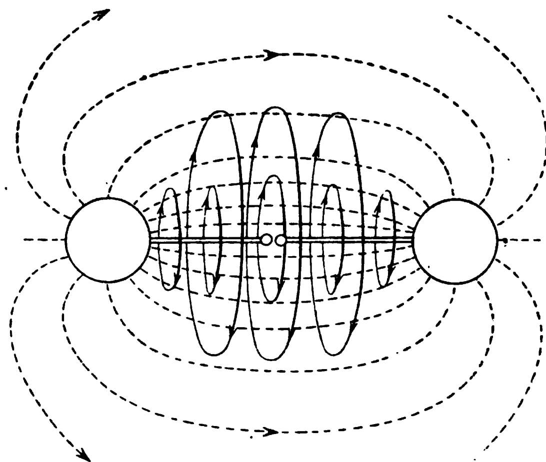


Fig. 143. Geradliniger. Oscillator.

Fig. 143 stellt die elektrischen Stromfäden und die (kreisförmigen) magnetischen Stromlinien nach $^1/_8$ Schwingung perspektivisch dar. Erstere sind durch strichlierte Linien angedeutet.

5. Anregung der elektromagnetischen Schwingungen.

§ 239. Die beschriebenen elektromagnetischen Oscillationen treten bei jeder Entladung eines Kondensators auf. Um eine grössere Zahl dieser Entladungen aufein-

ander folgen zu lassen unterbricht man den Schliessungskreis eines Kondensators oder einer Leydnerflasche *a b* Fig. 144 durch die Funkenstrecke $\alpha\beta$ und führt von den Elektroden α und β derselben sehr dünne Drähte zu einer Influenzmaschine *J* (oder auch zu einem Ruhmkorff'schen Induktor). Die Maschine lädt den Kondensator bis in der Funkenstrecke ein Funke auftritt. Während der kurzen Zeit, in welcher dieser Funke glüht, treten 20—100 Oscillationen des Kondensators auf, welche zufolge der dämpfenden Wirkungen immer schwächer werden,

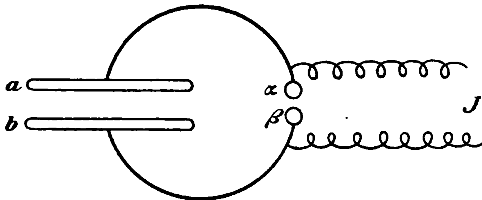


Fig. 144. Anregung der Oscillatoren.

bis sie endlich ganz aufhören, so dass auch der Funke erlischt. Nach einiger Zeit hat dann die Maschine den Kondensator von neuem geladen, so dass wieder ein Funke auftritt und der Kondensator sich abermals oscillatorisch entladet.

Die dünnen, langen Drähte, welche von der Maschine zu den Funkenkugeln $\alpha\beta$ führen, werden von den raschen Wechselströmen, die in dem Schliessungsdrahte des Kondensators während der Oscillation auftreten nicht durchflossen, nehmen also keinen Anteil an der Oscillation und stören oder modifizieren dieselbe nicht merklich.

6. Experimenteller Nachweis der elektromagnetischen Schwingungen.

§ 240. Wir haben bisher die Theorie der elektromagnetischen Oscillationen in ihren Grundzügen kennen gelernt. Dieselbe wurde von Kirchhoff (1860) entwickelt, kurz nachdem Feddersen das Vorhandensein dieser Oscillationen experimentell nachgewiesen hatte.

Es war bekannt, dass in dem Schliessungsdrahte einer Leydnerflasche während der Entladung ein Volta'scher Strom auftrete, und dass derselbe magnetisierende Wirkungen habe. Diese waren aber so unregelmässig, dass man über die Richtung dieses Stromes in Zweifel sein konnte. Um diese zu bestimmen, lenkte Paalzow (1861) die leuchtende Entladung einer Leydnerflasche in verdünnter Luft mittels eines Magneten ab.

Der Entladungsfunke einer Leydnerflasche in verdünnter Luft kann ein 20 cm langes, ziemlich dickes, gerades leuchtendes Band zwischen den Elektroden bilden (Fig. 145 a). Nähert man einen Magnet von vorn, so wird dieses leuchtende Band nach oben abgelenkt (Fig. 145 b), wenn der Entladungsstrom von links nach rechts geht, hingegen wird es nach unten abgelenkt, wenn der Entladungsstrom von der rechten zur linken Elektrode geht.

Hat der Schliessungskreis der Leydnerflasche eine schlechte Leitungsfähigkeit, so gelingen diese Ablenkungen des Funkens derselben. In diesem Falle tritt nur ein momentaner Strom auf, welcher von der negativen zur

positiven Belegung der Flasche durch die Entladungsstrecke fliesst, und die Flasche ohne Oscillation auslädt.

Hat aber der Schliessungskreis der Flasche kleinen Widerstand, so zerlegt der Magnet das leuchtende Entladungs-

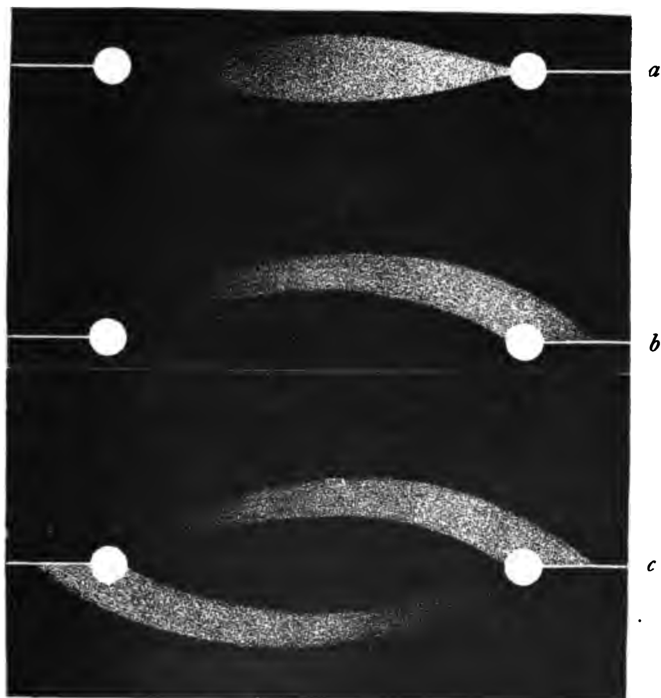


Fig. 145.
Ablenkung der Entladung einer Leydnerflasche durch den Magnet.

band in zwei leuchtende Bänder (Fig. 145 c), von welchen das eine nach oben, das andere nach unten abgelenkt ist. Während der Entladung folgen sich also Ströme von entgegengesetzten Richtungen in der Entladungsstrecke.

§ 241. Feddersen betrachtete den Entladungsfunken einer Leydnerflasche in einem rasch rotierenden Spiegel und erhielt das Bild Fig. 146. Dasselbe stellt nicht ein gleichmässiges leuchtendes Band dar, wie es sein müsste, wenn der Funke gleichmässig leuchten würde, sondern es stellt zehn getrennte Bilder des Funkens dar. Der Funke besteht also aus zehn getrennten Funken, welche rasch aufeinander folgen. Man sieht ferner, dass



Fig. 146. Feddersen'sches Funkenbild im rotierenden Spiegel.

diese Funken abwechselnd unten und oben hell sind, also abwechselnde Richtung haben. Man kann dieses Funkenbild auch leicht photographieren. Aus der Rotationsgeschwindigkeit des Spiegels und dem Abstand der Funkenbilder von einander kann man also die Zeitfolge dieser abwechselnden Funken, also die Schwingungsdauer der Leydnerflasche experimentell bestimmen.

7. Das Hertz'sche Elektroskop.

§ 242. Zum experimentellen Nachweis und zur Messung der elektrischen Oscillationen verwendete Hertz ein Elektroskop (Fig. 147), welche aus einem Kondensator besteht, zwischen dessen beiden Platten ein dünnes Aluminiumblättchen a schief gegen beide Platten an einem feinen Quarzfaden hängt. Sowie eine elektrische Strömung durch dieses Elektroskop geht, dreht sich das Blättchen

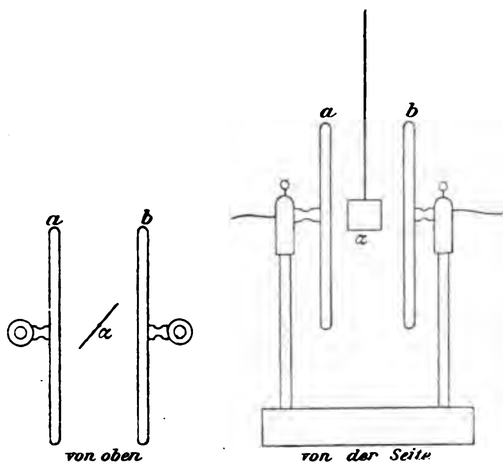


Fig. 147. Hertz'sches Elektroskop.

und zwar immer so, dass es sich gegen die Platten mehr senkrecht stellt, gleichgültig, welche Richtung die elektrische Strömung hat.

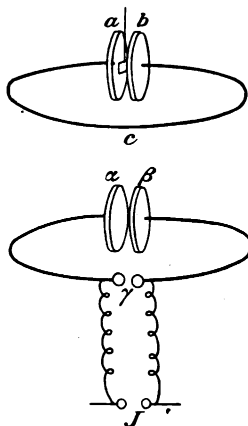


Fig. 148. Elektroskopischer Nachweis einer elektromagnetischen Oscillation.

Verbindet man die beiden Platten *a* und *b* durch einen Draht *a c b* (Fig. 148), so ist es ganz unmöglich, dass eine dauernde elektrische Strömung nun im Elektroskop vorhanden ist. Erzeugt man nun in der Nähe in einem anderen Oscillator $\alpha\,\gamma\,\beta$ eine elektrische Oscillation, so gerät der Kondensator *a b* und sein Schliessungsdraht *a c b* ins Mitschwingen und das Aluminium-

blättchen zeigt durch eine Drehung das Vorhandensein der (wechselnden) elektrischen Strömungen in dem Elektroskop an.

8. Resonanz zweier Oscillatoren.

§ 243. Damit das eben beschriebene Experiment gelingt, ist es jedoch nötig, dass die beiden Oscillatoren gut aufeinander abgestimmt sind, dass ihre elektromagnetischen Schwingungen genau gleiche Schwingungsdauer haben.

Hat man es einmal erreicht, dass das Elektroskop in dem sekundären Oscillator *a b* einen guten Ausschlag giebt, während man die Influenzmaschine *J* dreht, welche bei γ eine fortgesetzte Folge von Funken erzeugt und die Schwingungen in dem primären Oscillator $\alpha\beta$ unterhält, so darf man weder an dem primären noch an dem sekundären Resonator das geringste ändern, ohne die Abstimmung der Resonatoren zu verderben.

Entfernt man z. B. die Platten α und β des primären Oscillators ein wenig von einander, so hat derselbe sogleich eine etwas kürzere Schwingungsdauer als der sekundäre Oscillator und in diesem werden keine Schwingungen mehr angeregt. Verkürzt man nun aber den Schliessungsdraht *a c b* des sekundären Oscillators oder verlängert man den Schliessungsdraht des primären Oscillators, so dass beide Oscillatoren wieder gleiche Schwingungsdauer haben, so tritt wieder Resonanz ein und das Elektroskop zeigt wieder das Vorhandensein von elektrischen Schwingungen in dem sekundären Oscillator an.

§ 244. Diese von Hertz nachgewiesene elektromagnetische Resonanz spielt auch in dem Ruhmkorff'schen Induktionsapparat eine grosse Rolle.

Wir können nun die Wirkung des grossen Kondensators verstehen, welcher in dem Untersatzkasten des Ruhmkorff'schen Induktors verborgen zu sein pflegt und dessen Belegungen mit den Enden der primären Spule verbunden sind. Es ist damit erreicht, dass die primäre und die sekundäre Spule des Induktors gleiche elektromagnetische Schwingungsdauer haben. Wenn dieselben gut aufeinander abgestimmt sind, so ist die Wirkung der primären auf die sekundäre Spule eine viel ausgiebigere.

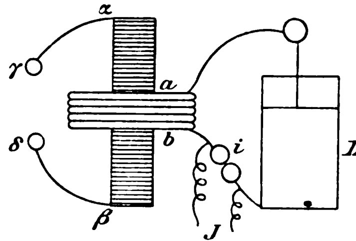
Da nun die sekundäre Spule viel mehr Windungen als die primäre hat, so haben elektromagnetische Oscillationen, welche in derselben verlaufen eine viel grössere Schwingungsdauer als in der primären Spule. Hängt man aber den grossen Kondensator an die Enden der primären Spule, so wird hierdurch die Schwingungsdauer derselben ebenso lang, wie die der sekundären Spule, womit die Resonanz beider Spulen gesichert ist und der Ruhmkorff seine beste Wirksamkeit erlangt.

Hängt man dann die Belegungen auch nur eines kleinen Kondensators an die Enden der sekundären Spule, so schwingt diese nun wieder zu langsam und der Ruhmkorff liefert nur mehr fünf- bis zehnmal kleinere Funken.

9. Der Tesla'sche Induktor.

§ 245. Während der Oscillation wird der Schliessungsdraht einer Leydnerflasche von einem sehr rasch

wechselnden Strome, dessen Stromstärke mehrere Ampère erreicht, durchflossen. Führt man also diesen Schliessungsdraht durch die primäre Spule eines Induktions-



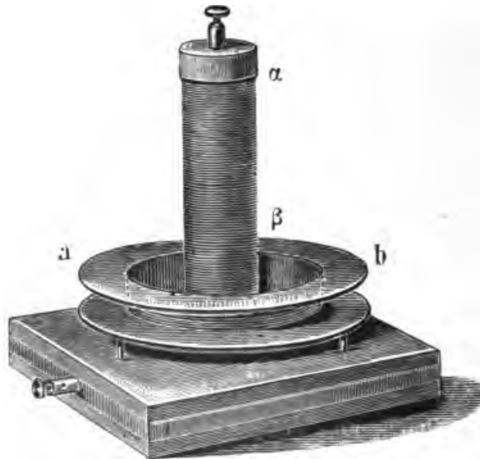


Fig. 149. Tesla'scher Induktor.

apparates, so wird die sekundäre Spule sehr kräftig induziert.

Der Tesla'sche Induktor besteht aus einer primären Spule *a b* (Fig. 149) von nur 20 Windungen (ohne Eisenkern). Die sekundäre Spule *α β* hat blos 200 Windungen.

Ein solcher Induktor würde, durch einen gewöhnlichen unterbrochenen Volta'schen Strom getrieben, kaum merkliche Fünkchen geben.

Schaltet man jedoch die primäre Spule *a b* in den Schliessungskreis der Leydnerflasche *L* und regt die Funken in der Unterbrechungsstelle *i* desselben mit Hilfe einer Influenzmaschine *J* an, von welcher zwei dünne Drähte zu den Funkenkugeln führen, so tritt in der primären Spule der Wechselstrom der oscillierenden Flasche auf, welcher 50 000 bis 100 000 Schwingungen in der Sekunde ausführt.

In der sekundären Spule $\alpha \beta$ treten nun die Tesla'schen Induktionsströme auf, welche in einer Unterbrechungsstelle $\gamma \delta$ des Schliessungskreises dieser Spule bis 30 cm lange Funken erzeugen.

Diese Tesla'schen induzierten Wechselströme zeichnen sich durch ihre rasche Oscillation, ihre hohe Spannung und ihre sehr geringe Stromstärke aus. Man kann merkwürdigerweise ohne die geringste physiologische Wirkung zu spüren, die Funkenstrecke $\gamma \delta$ durch den eigenen Körper schliessen, während das Anfassen des primären Schliessungskreises lebensgefährlich ist.

Eine Glühlampe, welche man in den Kreis des Tesla'schen Stromes schaltet, beginnt zu leuchten, was niemals der sekundäre Strom eines Ruhmkorff'schen Induktors bewirken könnte.

Des raschen Wechsels der Teslaschwingungen wegen vermeiden dieselben den Weg durch längere gutleitende Drähte und ziehen den Weg durch kurze schlechtleitende

Drähte und Glühlampen vor. Eine Glühlampe, neben welche man ein Drahtstück von 1 m Länge geschaltet hat, würde im konstanten Volta'schen Strom oder in einem langsam wechselnden Strome nicht leuchten. Im Teslastrome leuchtet sie aber, weil dieser nicht durch den nebengeschalteten Draht fliesst, da er nicht im stande ist, den zugehörigen rasch wechselnden magnetischen Wirbel um diesen längeren Draht hervorzurufen.

ZEHNTE VORLESUNG.

Die elektromagnetischen Wellen und die Hertz'schen Strahlen.

1. Verlauf der elektromagnetischen Schwingungen in grösserer Entfernung von einem geradlinigen Oscillator.

§ 246. Wir haben in § 238 den Verlauf der elektromagnetischen Schwingungen in der unmittelbaren Umgebung eines geradlinigen Oscillators kennen gelernt. Nun wollen wir die entferntere Umgebung desselben untersuchen. In Fig. 150 ist der Oscillator *a b* in kleinem Massstabe dargestellt, die krummen Linien und Pfeile geben den Verlauf der elektrischen Strömung für eine weitere Umgebung an, während wir in Fig. 143 blos die nächste Umgebung dargestellt haben.

In regelmässigen Abständen finden sich unter den elektrischen Stromlinien (Fig. 150) Kreise, und in diesen ist die Strömung am stärksten. Die Richtung der Strömung in diesen Kreisen wechselt jedoch regelmässig von dem einen zu dem anderen Kreise ab. In dem Raume

zwischen zwei Kreisen ist die Strömung schwächer, fliesst in wurstförmig gekrümmten Ringen und bildet also in jedem dieser Zwischenräume einen Wirbel.

In der Richtung *a' b'* des Oscillators ist die Strömung

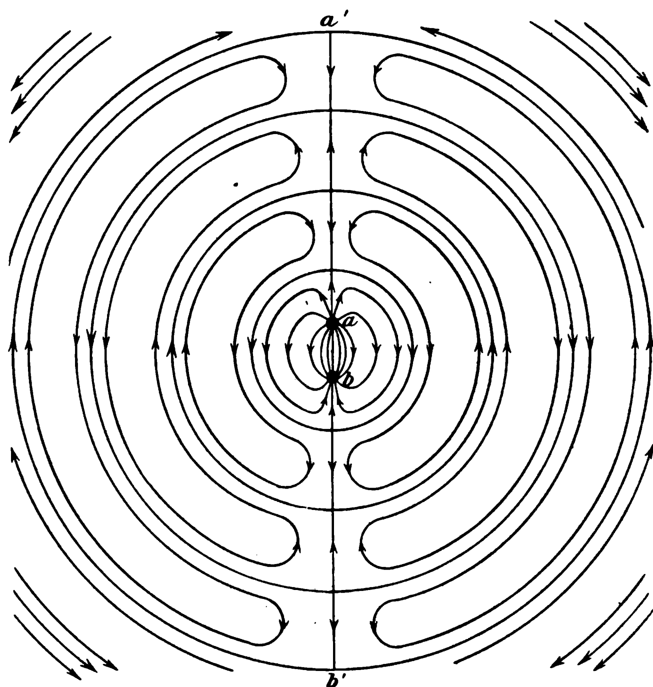


Fig. 150. Elektrische Strömung in der weiteren Umgebung eines Oscillators (nach Hertz).

geradlinig, fliesst aber in regelmässigen Abschnitten dieser Linie abwechselnd von dem Oscillator weg bezw. gegen den Oscillator hin.

Was die magnetische Strömung betrifft, deren Stromlinien in Fig. 150 nicht dargestellt werden konnten, so

fliesst dieselbe überall in Kreisen, deren Ebenen auf der Oscillatorrichtung $a' b'$ senkrecht stehen, und deren Mittelpunkte in diese Linien $a' b'$ fallen. Die magnetische Strömung hat jedoch in diesen Kreisen sehr verschiedene Stärke und verschiedenen Umlaufssinn, sie ist überall dort stark, wo die elektrische Strömung stark ist und wechselt in denselben regelmässigen Abschnitten ihre Richtung wie die elektrische Strömung.

§ 247. Dieses elektromagnetische Strömungsbild bleibt jedoch nicht ruhig stehen, sondern es ändert sich periodisch während jeder Schwingung des Oscillators. An jeder Stelle der ganzen Umgebung des Oscillators findet also eine elektromagnetische Schwingung statt. Der Vorgang hat aber im Ganzen einen sehr einfachen Charakter.

Das ganze Strömungsbild dehnt sich nämlich während der Schwingungen des Oscillators mit gleichmässiger Geschwindigkeit aus, ohne sonstige Änderungen zu erfahren. Die Kreise werden immer weiter, ohne dass sich die in ihnen vorhandene Strömung ändert, sie schreiten nach aussen fort und von innen kommen immer wieder neue Kreise nach, so dass nach einer halben Schwingung des Oscillators jeder Kreis an die Stelle des nächst weiteren getreten ist. Dann wird die ganze Strömung wieder genau durch Fig. 150 dargestellt, wenn man sich alle Strömungsrichtungen umgekehrt denkt.

Nach einer weiteren halben Schwingung haben sich die Kreise wieder um ihren Abstand ausgedehnt, so dass jeder an die Stelle des nächst weiteren getreten ist

und dann wird das ganze Strömungsbild wieder durch Fig. 150 dargestellt.

2. Die Hertz'schen Strahlen.

§ 248. Betrachten wir zunächst den Vorgang in der Nähe der Axenrichtung $a' b'$ des Oscillators. Die magnetische Strömung ist dort sehr schwach und umkreist diese Axenrichtung. Die elektrische Strömung hat in regelmässigen Abschnitten (Wellenlängen) abwechselnd die positive und negative Richtung der Axe. Das ganze Bild schreitet mit gleichförmiger Fortpflanzungsgeschwindigkeit in der Richtung dieser Axe fort. An jeder Stelle des Raumes fliesst die elektrische Strömung abwechselnd in der Richtung und gegen die Richtung der Fortpflanzungsaxe. Es findet also an jeder Stelle eine longitudinale oder längsgerichtete elektrische Schwingung statt. Den ganzen Vorgang in der Nähe der Axe nennt man einen longitudinalen elektrischen Strahl, welcher sich in der Axenrichtung fortpflanzt.

§ 249. Anders in der Richtung senkrecht zum Oscillator, z. B. rechts vom Oscillator. In diesem Gebiete fliesst die elektrische Strömung überall abwechselnd von oben nach unten und von unten nach oben, also parallel zu dem Oscillator. Die magnetische Strömung fliesst überall abwechselnd von vorn nach hinten und von hinten nach vorn, also senkrecht zum Oscillator. Beide Strömungen sind senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung der Erscheinung, welche sich ohne Änderung von links nach rechts verschiebt, und welche man einen trans-

versalen elektrischen Strahl nennt. An jeder Stelle dieses Gebietes findet eine transversale oder quergerichtete elektrische und magnetische Schwingung statt.

Die ganze Länge des Strahles zerfällt in gleich grosse Abschnitte (Wellenlängen), die einander völlig gleichen. In Anfang jeder Wellenlänge fliesst die elektrische Strömung mit grosser Stärke nach oben, die magnetische mit Stärke nach vorn, in der Mitte jeder Wellenlänge sind die Strömungen ebenso stark, aber umgekehrt gerichtet, dazwischen sind sie schwächer und findet der Übergang statt.

Die Tabelle auf Seite 306 giebt die Grösse und Richtung der Strömungen für acht gleiche Abschnitte einer Wellenlänge an.

§ 250. Man überzeugt sich zunächst aus jeder Kolonne der Tabelle, dass der Strahl eine periodische Struktur hat. Da nun derselbe mit gleichförmiger Geschwindigkeit nach rechts fortschreitet, so bedingen die in ihm hintereinander liegenden verschiedenen Eigenschaften, indem sie sich fortpflanzen, an jedem Ort, über welchen der Strahl fortschreitet, eine fortwährende rasche Veränderung der Strömungen.

Wenn die letzte Zeile der Tabelle den Zustand an irgend einem Orte beschreibt, so ist nach $^1/_8$ Schwingung des Oscillators der durch die vorletzte Zeile der Tabelle, nach $^1/_4$ Schwingung des Oscillators der durch die siebente Zeile der Tabelle beschriebene Zustand dort vorhanden u. s. f.

Deshalb bedingt auch eine rasche Änderung der Strömung von Ort zu Ort im unmittelbar folgenden Teile des Strahles gleichzeitig eine rasche zeitliche Veränderung der Strömung an dieser Stelle.

Ort	Elektrische Strömung			Elektrischer Quirl		Magnetische Strömung			Magnetischer Quirl	
	Stärke	Richtung	Änderung	Stärke	Richtung	Stärke	Richtung	Änderung	Stärke	Richtung
Anfang der Welle	stark	nach oben	Null	Null	Null	stark	nach vorn	Null	Null	Null
1/8 Wellenlänge	mittel	nach oben	rascher	mittel	nach vorn	mittel	nach vorn	rascher	mittel	nach oben
1/4 Wellenlänge	Null	Null	rasch	stark	nach vorn	Null	Null	rasch	stark	nach oben
3/8 Wellenlänge	mittel	nach unten	langsamer	mittel	nach vorn	mittel	nach hinten	langsamer	mittel	nach oben
1/2 Wellenlänge	stark	nach unten	Null	Null	Null	stark	nach hinten	Null	Null	Null
5/8 Wellenlänge	mittel	nach unten	rascher	mittel	nach hinten	mittel	nach hinten	rascher	mittel	nach unten
3/4 Wellenlänge	Null	Null	rasch	stark	nach hinten	Null	Null	rasch	stark	nach unten
7/8 Wellenlänge	mittel	nach oben	langsamer	mittel	nach hinten	mittel	nach vorn	langsamer	mittel	nach unten
Ende der Welle	stark	nach oben	Null	Null	Null	stark	nach vorn	Null	Null	Null

§ 251. Man überzeuge sich nun, dass der durch obige Tabelle beschriebene elektromagnetische Transversalstrahl die beiden Grundgesetze der elektromagnetischen Änderungen (§ 229) erfüllt und also eine wirklich mögliche elektromagnetische Erscheinung ist.

Man ersieht aus jeder Zeile der Tabelle, dass dort, wo sich die elektrische Strömung zeitlich rasch ändert, der magnetische Quirl stark ist, und umgekehrt.

Andererseits bedeutet hier, wo die Strömungen geradlinig und transversal sind, eine rasche Änderung einer Strömung von Ort zu Ort in der Längsrichtung des Strahles auch das Vorhandensein eines starken Quirls dieser selben Strömung. Es wird deshalb auch dort, wo die magnetische Strömung sich rasch ändert, der magnetische Quirl stark sein und das gleiche wird für die elektrische Strömung und den elektrischen Quirl gelten. Es hat also hier der magnetische und elektrische Quirl immer an gleicher Stelle seine grösste Stärke und ebenso die elektrische und magnetische Strömung, was man ebenfalls aus jeder Zeile der Tabelle ersehen kann.

3. Experimenteller Nachweis der Hertz'schen Strahlen.

§ 252. J. Clerk Maxwell, welchem es gelungen ist, die Faraday'schen Vorstellungen von dem Wesen der elektromagnetischen Erscheinungen in exakt-mathematische Form zu kleiden, hatte schon im Jahre 1862 die Theorie der elektromagnetischen Strahlen gegeben. Aber erst 1888

gelang es Heinrich Hertz, diese Strahlen experimentell nachzuweisen.

Diese Strahlen werden von den geradlinigen Oscillatoren ausgesendet. Die Grundform dieser Oscillatoren ist in Fig. 151 a dargestellt. Zwei Metallkugeln *A* und *B* sind durch einen Draht verbunden, welcher durch die Funkenstrecke *a b* unterbrochen ist. Von beiden Elektroden der Funkenstrecke führen dünne Drähte zu einer Influenzmaschine oder zu einem Ruhmkorff *R*. Ein solcher Oscillator macht dreihundert Millionen elektromagnetische Schwingungen in der Sekunde.

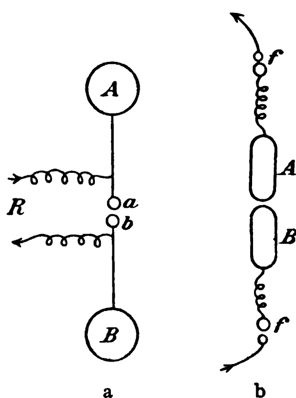


Fig. 151.
Hertz'sche Excitatoren.

Um noch raschere Schwingungen zu erhalten, verwendete man den Oscillator Fig. 151 b. Derselbe besteht aus zwei kurzen Metallklötzchen *A* und *B*, zwischen welchen eine Funkenstrecke bleibt, und welche durch dünne Drähte mit dem Ruhmkorff verbunden werden. Es ist für die Anregung der Schwingungen gut, auch diese dünnen Drähte noch durch Funkenstrecken *f* zu unterbrechen. Dieser Excitator macht bis zehn Milliarden Schwingungen in der Sekunde.

Die kleinsten Excitatoren, welche man bisher verwendet hat, gaben 100 Milliarden Schwingungen in der Sekunde.

§ 253. Zum Nachweise dieser Schwingungen verwendet man die Empfänger, von welchen Fig. 152 drei Formen darstellt. Die Form a hat den Typus der geradlinigen Oscillatoren, sie besteht aus zwei Blechstücken, welche durch eine sehr kleine Funkenstrecke getrennt sind. Stellt man einen solchen Empfänger in einen elektromagnetischen Strahl, so dass er den elektrischen Schwingungen desselben, also auch dem Excitator, parallel steht, so gerät er selbst in elektrische Schwingungen,

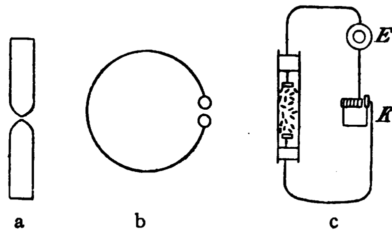


Fig. 152.
a Elektrischer Empfänger. b Magnetischer Empfänger. c Coherer.

welche sich durch kleine Fünkchen in seiner Funkenstrecke verraten.

Die Form b (Fig. 152) des Empfängers wurde ebenfalls von Hertz angewendet. Sie besteht aus einem Drahtkreis, welcher durch eine kleine Funkenstrecke unterbrochen ist. Ändert sich die senkrecht durch die Fläche dieses Drahtkreises fliessende magnetische Strömung rasch, so wird in demselben ein Strom induziert. Hält man ihn so in einen elektromagnetischen Strahl, dass die magnetischen Strömungen desselben voll durch die von ihm umspannte Fläche fliessen, so gerät er in elektro-

magnetische Schwingungen, welche sich durch kleine Fünkchen in seiner Funkenstrecke verraten. Beide Empfänger können auf den Excitator abgestimmt werden, so dass sie die gleiche Schwingungsdauer haben, in welchem Falle sie sehr deutlich auf die von demselben ausgehenden Strahlen ansprechen.

§ 254. Die dritte Form des Empfängers: der Coherer, ist für weniger feine Experimente die vorteilhafteste. Der Coherer besteht aus einem Glasröhrchen, welches mit Metallstückchen, z. B. Eisennägeln, gefüllt ist und durch welche der Strom eines Volta'schen Elementes E gesendet wird. Die Berührung zwischen den Metallstückchen ist jedoch so schlecht, dass der Strom ungeschlossen ist. Trifft nun ein elektromagnetischer Strahl den Coherer, so treten in diesem viele kleine Fünkchen auf, so dass die Metallstückchen an mehreren Stellen zusammenschmelzen und der Strom geschlossen ist. Eine in diesen Strom geschaltete elektrische Klingel K ertönt also, sowie der Coherer von einem Hertz'schen Strahl getroffen wird. Klopft man dann ein wenig an den Coherer, so brechen die Metallstückchen wieder auseinander und die Klingel schweigt.

4. Die Hertz'schen Experimente.

§ 255. Die elektromagnetischen Strahlen werden von Metallplatten reflektiert. Um dieselben zu sammeln, verwendete Hertz grosse parabolische Spiegel aus Zinkblech, in deren Brennlinie f der Excitator angebracht ist. Auch

der Empfänger kann in der Brennlinie eines solchen Spiegels stehen.

Stellt man die beiden Spiegel *S* mit den Öffnungen einander zugewendet in einigen Metern Entfernung ein-

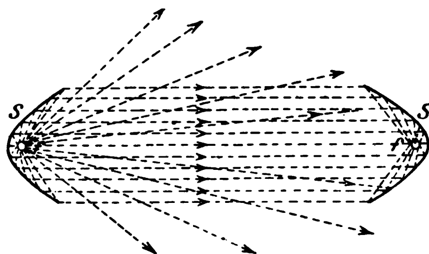


Fig. 153. Hertz'sche Strahlen.



Fig. 154. Hertz'scher Spiegel.

ander gegenüber (Fig. 153), so spricht der Empfänger sofort an, wenn man Funken in dem Excitator erzeugt.

Hält man einen Metallschirm quer in den Weg der Strahlen, so werden dieselben abgehalten und der Empfänger spricht nicht an. Öffnet man nun ein Loch in

der Mitte des Metallschirmes, so gelangen wieder einige Strahlen auf den Empfänger, und dieser zeigt sie an.

Ein Papier- oder Holzschirm lässt die Strahlen ungeschwächt hindurch. Ein Gitter aus zahlreichen parallelen Drähten lässt die Strahlen durch, wenn die Drähte senkrecht zu den elektrischen Schwingungen derselben stehen, stehen sie parallel zu den elektrischen Schwingungen, so geraten die Drähte in Mitschwingung und reflektieren den Strahl.

Wendet man einen der beiden Spiegel ab (Fig. 155), so spricht der Empfänger nicht mehr an. Man kann jedoch nun die Strahlen mittels eines ebenen Zinkblechspiegels *S* wieder zu dem Empfänger hin reflektieren, und derselbe zeigt sie dann an.

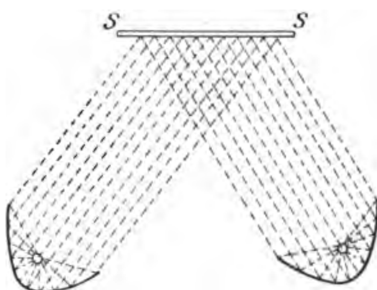


Fig. 155.
Reflexion der Hertz'schen Strahlen.

Auch beim Durchtritt durch ein grosses Prisma aus Pech werden sich die Strahlen von ihrer Richtung abgelenkt.

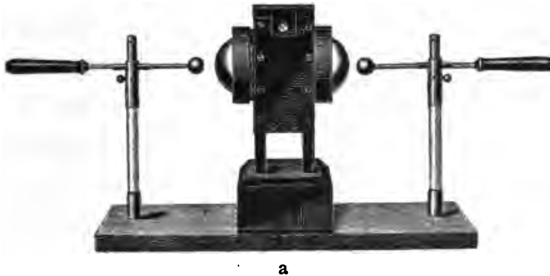
Steht der Excitator senkrecht und legt man den Empfänger horizontal, so spricht er nicht mehr an. Hält man nun den Excitator ebenfalls horizontal, so spricht der Empfänger wieder an.

Das Vorhandensein der elektromagnetischen Strahlen lässt sich durch diese Versuche ungemein augenfällig nachweisen. Auch dass dieselben aus quergerichteten (transversalen) Schwingungen bestehen, ist nach dem letzten

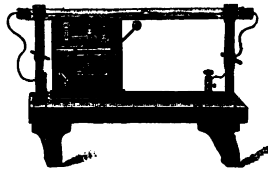
Versuche deutlich. Die periodische Natur des Strahles, die Zusammensetzung desselben aus vielen gleichartigen Stücken (den Wellenlängen) kann jedoch nur an stehenden Hertz'schen Strahlen (§ 257) nachgewiesen werden.

5. Die drahtlose Telegraphie.

§ 256. Marconi verwendete den Branly'schen Coherer (§ 254), um mittels Hertz'scher Strahlen Depeschen auf weite Entfernung (ohne Telegraphendrähte) zu senden.



a



b

Fig. 156. Marconi'sche Apparate.
a Excitator. b Coherer mit Klopfer.

Der Volta'sche Strom des Coherers treibt statt der elektrischen Klingel einen gewöhnlichen Telegraphenapparat und einen kleinen Klopfer, welcher an den Coherer schlägt und damit den Strom unterbricht.

Versetzt man auf der ersten Station den Excitator kurze Zeit in Schwingung, so schliesst sich auf der Empfangsstation der Strom des Coherers, der Telegraphenapparat giebt ein Zeichen und der Klopfer unterbricht wieder den Strom, so dass der Coherer von neuem empfangsfähig ist.

6. Die stehenden elektrischen Wellen.

§ 257. Wenn man einen Hertz'schen Strahl auf eine Metallwand senkrecht auffallen lässt, so wird er von derselben reflektiert. Der reflektierte und der auffallende Strahl stören sich gegenseitig nicht, sondern decken sich einfach übereinander, derart, dass dort, wo zufolge des auffallenden Strahles eine elektrische Strömung nach aufwärts auftreten soll und zufolge des reflektierten Strahles die gleiche Strömung auftreten sollte, zufolge des Zusammenwirkens beider Strahlen die doppelte elektrische Strömung auftritt. Dort aber, wo zufolge des auffallenden Strahles eine Strömung nach aufwärts und zufolge des reflektierten Strahles dieselbe Strömung nach abwärts eintreten sollte, sich diese Wirkungen der beiden Strahlen aufheben und keine Strömung eintritt.

Man sieht leicht ein, dass durch das Zusammenwirken der beiden Strahlen ein Schwingungsvorgang vor der reflektierenden Metallwand eintritt, welcher von einem fortschreitenden Strahle charakteristisch verschieden ist: eine stehende Welle. Es werden nämlich an jenen Stellen, wo der einfallende und der reflektierte Strahl ihre Wirkung

in einem gegebenen Augenblicke verstärken, sie sich immer verstärken (Bäuche der stehenden Welle), und wo sie sich einmal aufheben, sich immer aufheben, so dass an gewissen, um je eine halbe Wellenlänge von einander abstehenden Stellen (Knoten der stehenden Welle) dauernd keine Schwingung eintritt.

§ 258. Die Tabelle auf Seite 316 giebt die Stärke der elektrischen und magnetischen Schwingungen in acht gleichen Abschnitten einer ganzen Wellenlänge vor der Wand an.

Der einfallende Strahl geht von links nach rechts, der reflektierte von rechts nach links.

Der Excitator, welcher den einfallenden Strahl aussendet, ist hierbei als von vorn nach hinten gerichtet angenommen. Man erkennt, dass die magnetischen Knoten um $^1/_4$ Wellenlänge gegen die elektrischen Knoten verschoben sind. An der reflektierenden Wand liegt ein elektrischer Knoten, aber ein Bauch der magnetischen Schwingung.

In den Bäuchen ändert sich die Strömung rasch mit der Zeit aber nur wenig mit der Entfernung von der Wand, so dass dort die Strömungsquirl schwach sind. In den Knoten ändert sich die Strömung nicht mit der Zeit, aber rasch von Ort zu Ort, so dass dort die Strömungsquirl stark sind. Aus diesem Grunde muss ein elektrischer Knoten immer auf einen Bauch der magnetischen Schwingung fallen und umgekehrt, damit die beiden Grundgesetze der elektromagnetischen Änderungen erfüllt sind.

Ort	Elektrische Schwingung		Magnetische Schwingung	
	Stärke	Richtung nach:	Stärke	Richtung nach:
An der Wand	Null	Null	stark	oben — unten — oben
1/8 Wellenlänge davor	mässig	hinten — vorn — hinten	mässig	oben — unten — oben
1/4 Wellenlänge davor	stark	hinten — vorn — hinten	Null	Null
3/8 Wellenlänge davor	mässig	hinten — vorn — hinten	mässig	unten — oben — unten
1. Knoten	Null	Null	stark	unten — oben — unten
5/8 Wellenlänge vor der Wand	mässig	vorn — hinten — vorn	mässig	unten — oben — unten
3/4 Wellenlänge vor der Wand	stark	vorn — hinten — vorn	Null	Null
7/8 Wellenlänge vor der Wand	mässig	vorn — hinten — vorn	mässig	oben — unten — oben
2. Knoten	Null	Null	stark	oben — unten — oben

§ 259. Hält man den elektrischen Empfänger (Figur 152a) in die stehende elektromagnetische Welle, so dass er dem Excitator parallel steht, also von vorn nach hinten

gerichtet ist, so wird er Fünkchen geben in $^1/_4$, $^3/_4$, $^5/_4$ etc. Wellenlängen Entfernung von der Wand, dort, wo die Bäuche der elektrischen Schwingungen sind. Unmittelbar an der reflektierenden Wand und in $^1/_2$, 1, $^3/_2$ etc. Wellenlängen Entfernung, wo die elektrischen Knoten sind, spricht dieser Empfänger nicht an.

Hält man hingegen den magnetischen Empfänger (Figur 152b) in die stehende Welle, so dass seine Kreisfläche horizontal steht und also die magnetische Schwingung senkrecht hindurch fliesst, so spricht er nicht an in $^1/_4$, $^3/_4$, $^5/_4$ Wellenlänge Entfernung von der Wand und zeigt Fünkchen in den Bäuchen der magnetischen Schwingung, d. i. unmittelbar an der reflektierenden Wand und in $^1/_2$, 1, $^3/_2$ Wellenlänge Entfernung von der Wand.

Man kann auf diese Weise 10—20 solcher stehenden Wellen vor einer reflektierenden Wand experimentell nachweisen und ihre Wellenlänge bestimmen.

Die ersten Strahlen, welche Hertz erzeugte, hatten 27 cm Wellenlänge. Seither hat man auch kürzere elektrische Wellen (bis 3 mm Wellenlänge) hergestellt und untersucht.

7. Die Fortpflanzungsgschwindigkeit der elektromagnetischen Strahlen.

§ 260. Die Wellenlänge einer stehendeh Welle ist eben jene Distanz, durch welche sich der direkte von dem Excitator kommende elektrische Strahl während einer Schwingung des Excitators fortpflanzt.

Wenn man also die Schwingungsdauer des Excitators und die Wellenlänge der stehenden Welle bestimmt, so kann man hieraus die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Strahlen berechnen.

Die Messung der Schwingungsdauer kann nach der in § 241 angeführten Methode durchgeführt werden. Für grössere Excitatoren vom ursprünglichen Typus (§ 238, Fig. 143) kann die Schwingungsdauer auch berechnet werden.

Ein solcher Excitator macht in der Sekunde ungefähr 100 Millionen Schwingungen. Reflektiert man nun die von demselben ausgesandten Strahlen, so erhält man eine stehende Welle, deren Wellenlänge 3 m beträgt. Der elektromagnetische Strahl pflanzt sich also in einem Hundertmillionstel Sekunde um 3 m, d. h. in einer Sekunde 300000 Kilometer weit fort.

Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit dieser Strahlen ist also gerade millionmal grösser als die des Schalles (338 m pro Sekunde). Dies kommt daher, dass ganz enorm rasche Änderungen der magnetischen Strömung in Luft nötig sind, um einen elektrischen Quirl, und enorm rasche Änderungen der elektrischen Strömung in Luft nötig sind, um einen magnetischen Quirl von merklicher Stärke hervorzurufen. Aus diesen Grössenbeziehungen, die schon aus den Faraday'schen Experimenten, § 210 und § 216, folgen, hat Maxwell 1862 die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Strahlen in Luft berechnet, also lange bevor Hertz diese Strahlen wirklich herstellte, und konnte genau voraussagen, dass diese

Strahlen 282000 bis 311000 Kilometer in der Sekunde zurücklegen würden.

Die ersten Hertz'schen Strahlen hatten 27 cm Wellenlänge. Um diese Strecke zu durchlaufen, brauchen sie nur 0,9 Tausendmillionstel Sekunde. Der Hertz'sche Excitator macht also tausend Millionen Schwingungen in 0,9 Sekunden. Die kleinsten Excitatoren, welche man bisher benutzt hat, geben Strahlen, welche nur 3 mm Wellenlänge haben. Diese Strecke von 3 mm durchläuft der Strahl in einem Hunderttausendmillionstel Sekunde. Diese kleinen Excitatoren machen also 100000000000 Schwingungen in der Sekunde.

Da es sehr leicht ist, stehende Hertz'sche Strahlen herzustellen und zu untersuchen, so kann man die Fortpflanzungsgeschwindigkeit dieser Strahlen in den verschiedensten Stoffen bestimmen. Da nämlich die Wellenlänge gleich der Strecke ist, um welche der Strahl während einer Schwingung des Oscillators fortschreitet, so muss seine Wellenlänge in jenen Stoffen entsprechend kürzer sein, in welchen sich der Strahl langsamer fortpflanzt. So zeigt sich, dass die Hertz'schen Strahlen in Wasser 1,33, in Benzol 1,5, in Glas 1,7 mal langsamer fortschreiten, als in Luft, was Maxwell ebenfalls genau vorausgesagt hat.

8. Die elektromagnetischen Drahtwellen.

§ 261. Man kann noch eine andere Art elektromagnetischer Wellen erzeugen, welche sich nicht durch die freie Luft, sondern nur längs eines Drahtes fortpflanzen.

Der Ruhmkorff *R* Fig. 157 rege in dem Oscillator *ABcd* elektrische Schwingungen an. *AB* ist der Kondensator, welcher sich in der Funkenstrecke *cd* ausladet und hierbei in seinem Schliessungskreise Oscillationen anregt. In der Nähe der Platten *AB* dieses Kondensators stehen die kleinen Platten $\alpha\beta$, von welchen die langen parallelen Drähte $\alpha\alpha'$ und $\beta\beta'$ ausgehen. Während der Schwingung des Oscillators, an welcher sich auch die Platten α und β beteiligen, entsteht nun in diesen Drähten eine fortschreitende elektromagnetische Drahtwelle.

In regelmässigen Abständen (den Wellenlängen der Drahtwelle) gehen dann quer zwischen den Drähten elek-

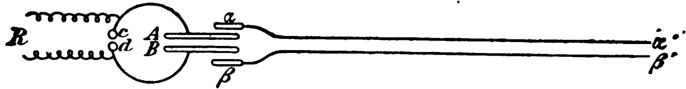


Fig. 157. Excitation elektromagnetischer Drahtwellen.

trische Strömungen über und werden diese Drähte von magnetischen Strömen umkreist. Es sind also die Drähte in regelmässigen Abständen abwechselnd positiv und negativ geladen und von abwechselnden Volta'schen Strömen durchflossen.

Nebenstehende Tabelle giebt diese Verhältnisse genauer an. Es ist angenommen, dass die beiden Drähte von links nach rechts verlaufen und in derselben vertikalen Ebene liegen.

Dieses ganze Strömungsbild bewegt sich mit gleichförmiger Geschwindigkeit von links nach rechts längs der Drähte fort, wobei von links immer neue Wellen hinzutreten.

§ 262. Verbindet man die Enden $\alpha' \beta'$ der Drähte durch ein quer übergelegtes Drahtstückchen (die Brücke), so gehen die Wellen von einem Draht auf den anderen über und laufen in diesem wieder zurück. Man hat dann in jedem Drahte eine direkt von dem Excitator kommende und eine zurücklaufende Drahtwelle, so dass in der Nähe der Brücke $\alpha' \beta'$ eine stehende elektromagnetische Drahtwelle entsteht.

Drahtstelle	Erster Draht		Zweiter Draht	
	Elektrische Ladung	Volta'scher Strom	Elektrische Ladung	Volta'scher Strom
Anfang der Welle	Null	Null	Null	Null
$^1/_4$ Wellenlänge .	+	nach rechts	—	nach links
$^1/_2$ Wellenlänge .	Null	Null	Null	Null
$^3/_4$ Wellenlänge .	—	nach links	+	nach rechts
1 Wellenlänge . .	Null	Null	Null	Null
$^5/_4$ Wellenlänge .	+	nach rechts	—	nach links
$^3/_2$ Wellenlänge .	Null	Null	Null	Null
$^7/_4$ Wellenlänge .	—	nach links	+	nach rechts
2 Wellenlängen .	Null	Null	Null	Null

Zu regelmässigen Abständen von den Drahtenden (den elektrischen Knoten) sind und bleiben die Drähte ungeladen und zwar ist dies der Fall an der Brücke selbst und in $^1/_2$, 1, $^3/_2$ etc. Wellenlänge Entfernung von derselben. In den zwischenliegenden Stellen, den Bäuchen der Welle wechselt hingegen die Ladung der Drähte rasch. An diesen Stellen liegen die magnetischen Knoten. In den elektrischen Knoten liegen hingegen die Bäuche der

magnetischen Schwingung, dort sind die Drähte in abwechselnder Richtung von Wechselströmen durchflossen.

§ 263. Die elektrische Schwingung in den Bäuchen der elektrischen Welle kann man mittels eines Hertz'schen Elektroskopes nachweisen, dessen beide Platten man mittels kurzer Drähte dort an die beiden Wellendrähte anschliesst, und man kann also mit Hilfe dieses Instrumentes die Wellenlänge der Drahtwellen bestimmen.

§ 264. Die wechselnden Strömungen treten (besonders bei rascher Oscillation des Excitators) nur in der Luft in der Umgebung der Drähte auf und die Wechselströme verlaufen nur in der äussersten Oberfläche der Drähte. Man kann deshalb statt in massiven Metalldrähten die elektrischen Drahtwellen ebensowohl längs versilberter Glasröhren fortleiten.

9. Rückblick.

§ 265. Noch vor 25 Jahren hielt man die Mitteilung der elektrischen Ladung durch Berührung und die Entladung einer Leydnerflasche durch den Schliessungsdraht für einfache Ausgleichsvorgänge, bei welchem die elektrischen Ladungen wie Flüssigkeiten (elektrische Fluida) überfliessen und sich neutralisieren.

Jetzt weiss man, dass dieser Vorgang eine lebhafte nicht nur elektrische, sondern auch magnetische Oscillation ist, dass elektromagnetische Strahlen von dem Schliessungsdrahte ausgesendet werden und elektrische Drahtwellen von demselben abgeleitet werden können.

Wer hätte dies vor einigen Jahrzehnten ahnen können! Ein schönes Beispiel, wie die Forschung auf weiten Umwegen zu einem tiefen Einblick in das Wesen eines Vorganges führen kann, zu dessen unmittelbarer Untersuchung unsere Sinne, unsere spekulative Kraft und Phantasie bei weitem nicht hingereicht hätte.

Es giebt noch viele solche scheinbar einfache Ausgleichsvorgänge (beispielsweise sei auf den Wärmeausgleich durch Wärmeleitung hingewiesen), deren Theorie noch einer ähnlichen Entwickelung harrt.

ELFTE VORLESUNG.

Das Licht.

1. Geradlinige Lichtstrahlen. Reflexion.

§ 266. Zwischen den elektrischen Erscheinungen und den Verbrennungsvorgängen besteht eine enge Beziehung (siehe § 171). Andererseits ist die Umkehrung der Verbrennungsvorgänge: die pflanzliche Assimilation (die Verwandlung verbrannter Stoffe in brennbare), eine Wirkung des Lichtes. Faraday war der erste, welcher vermutete, dass das Licht ein wesentlich elektrischer Vorgang sei. Hierdurch gewannen die jahrhunderte alten Forschungen über die Natur des Lichtes, mit welchen wir uns in dieser Vorlesung beschäftigen wollen, eine enge Beziehung zu den Untersuchungen über die elektrischen und magnetischen Erscheinungen.

§ 267. Das Sonnenlicht, welches durch ein Loch im Fensterladen in ein Zimmer tritt, pflanzt sich in demselben in einem geradlinigen Strahle fort. Eine Kerze sendet ihr Licht nach allen Seiten. Hält man in die geradlinige Verbindung der Kerze und des Auges einen

für das Licht undurchlässigen Körper, so erblickt man die Kerze nicht mehr. Man kann also mit einiger Annäherung an das Richtige sich vorstellen, dass die Kerze nach allen Seiten geradlinige Lichtstrahlen aussendet. Trifft Licht auf irgend einen Körper, z. B. auf ein Stück Kreide, so erblickt man denselben ebenfalls von allen Seiten, er wirft also die von der Kerze empfangenen Strahlen nach allen Seiten auseinander. Das Stück Kreide ist, solange es beleuchtet wird, selbst eine Lichtquelle.

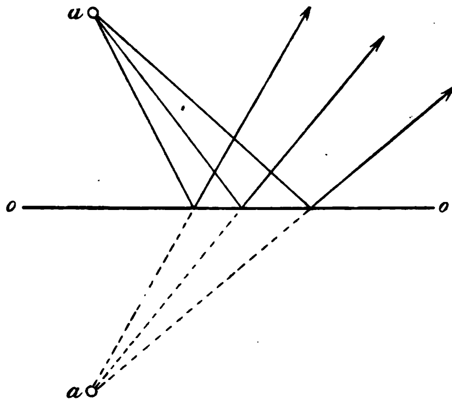


Fig. 158. Spiegelbild eines Punktes.

§ 268. Trifft jedoch ein Lichtstrahl auf eine glatte Fläche, so wird er nur nach einer Seite reflektiert. Der einfallende und der reflektierte Strahl bilden denselben Winkel mit dem reflektierenden Spiegel und liegen in einer auf demselben senkrechten Ebene. In Fig. 158 sind drei Strahlen durch gerade Linien dargestellt, welche von einem leuchtenden Punkt *a* ausgehen, sie werden von dem Spiegel *o o′* in solche Richtungen reflektiert, als

kämen sie von dem Punkte *a'*, welcher ebenso weit hinter dem Spiegel liegt, als *a* vor dem Spiegel. Ein Auge, welches das reflektierte Licht empfängt, erblickt also hinter dem Spiegel einen leuchtenden Punkt *a'*, das **Spiegelbild** des leuchtenden Punktes *a*.

§ 269. Befindet sich vor dem Spiegel ein Gegenstand, z. B. der Pfeil *ab*, Fig. 159, so wird man hinter dem

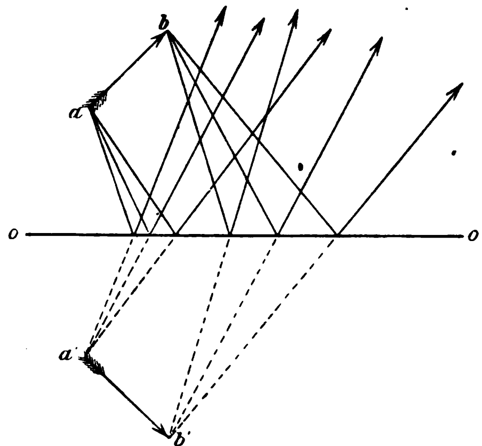


Fig. 159. Spiegelbild.

Spiegel das Spiegelbild *a'* des Punktes *a*, das Spiegelbild *b'* des Punktes *b* und überhaupt die Spiegelbilder aller Punkte des Gegenstandes sehen. Das ganze Spiegelbild des Gegenstandes liegt zu diesem in Bezug auf die Spiegelebene symmetrisch.

§ 270. Ist die Spiegelfläche nicht eben, sondern gekrümmt, so verhält sich jedes Stückchen der Spiegelfläche so wie ein kleiner ebener Spiegel. Da aber diese kleinen

Spiegelchen verschiedene Richtungen haben, so wird ein Bündel von Strahlen, welches von einem leuchtenden Punkte auf den gekrümmten Spiegel fällt, in anderer Weise verwandelt von demselben reflektiert, als von einem ebenen Spiegel. Fig. 160 zeigt einen Hohlspiegel *o o'*, welcher das von dem leuchtenden Punkte *a* kommende Strahlenbündel zurückwirft. Alle reflektierten Strahlen gehen durch den (hier vor dem Spiegel liegenden) Punkt *a'*. Von diesem Punkte *a'* gehen die Strahlen dann weiter, derselbe leuchtet also, allerdings nicht nach allen Seiten, und heisst das reelle Bild des Punktes *a*. Von einem Gegenstande liefert der Hohlspiegel ein Bild, welches jedoch je nach der Stellung des Gegenstandes gegen den Spiegel kleiner oder grösser ist als der Gegenstand. Von der Sonne liefert der Spiegel ein punktförmiges Bild in seinem „Brennpunkte“ *f* (Fig. 160).

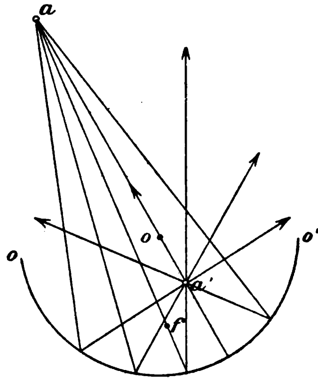


Fig. 160. Hohlspiegel.

2. Brechung der Lichtstrahlen.

§ 271. Wenn ein Lichtstrahl auf die Oberfläche eines Körpers trifft, so wird er nicht blos reflektiert, sondern er spaltet sich in zwei Strahlen, von welchen der eine reflektiert wird, während der andere in den Körper eindringt. In Fig. 161 stellt *1 o* den einfallenden, *o 2* den

reflektierten und *o 3* den gebrochenen Strahl dar. Der gebrochene Strahl liegt immer in derselben Ebene wie der einfallende und der reflektierte Strahl, ausgenommen bei der Brechung des Lichtes in Krystallen, wobei ausser dem reflektierten Strahle zwei gebrochene Strahlen auftreten (Doppelbrechung).

Der gebrochene Strahl bildet nicht die geradlinige Fortsetzung des einfallenden Strahles, sondern verläuft

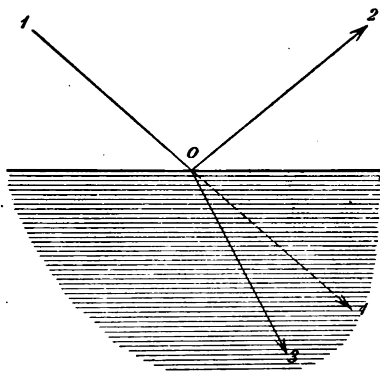


Fig. 161. Brechung zum Lote.

steiler gegen die Oberfläche, wenn der Stoff, in welchen das Licht eindringt, „optisch dichter" ist als jener, aus welchem das Licht kommt (Fig. 161). Wenn aber der Stoff, in welchen das Licht eindringt, optisch dünner ist als der Stoff, aus welchem das Licht kommt, so verläuft der gebrochene Strahl weniger steil gegen die Oberfläche als der einfallende Strahl (Fig. 162).

Nach ihrer optischen Dichte geordnet mögen folgende durchsichtige Stoffe genannt werden: Luft, Wasser, Kalkspat, Krystallglas, Öl, Schwefelkohlenstoff, schweres Bleiglas.

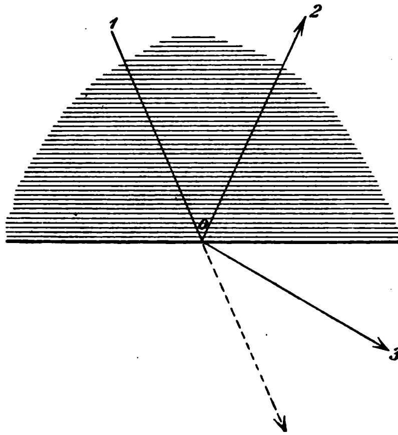


Fig. 162. Brechung vom Lote.

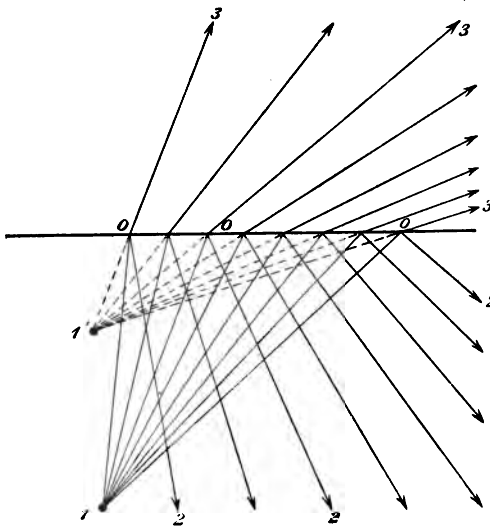


Fig. 163. Optische Hebung.

In Fig. 163 ist ein Lichtbüschel *1 o* dargestellt, welches von einem leuchtenden Punkte *1* ausgeht, welcher unter der Wasseroberfläche *o o'* sich befindet. Das reflektierte Bündel verläuft in der Richtung *o 2*. Die in die Luft austretenden gebrochenen Strahlen *o 3* verlaufen alle nahezu so, als kämen sie von dem Punkte *1'*, welcher das Bild des Punktes *1* heisst. Ein Auge bei *3* kann also nicht den leuchtenden Punkt *1* an seinem wirklichen Orte sehen, sondern sieht den Punkt *1'* näher an der Wasseroberfläche liegen. Steine, welche am Grunde eines klaren Sees liegen, scheinen zufolge dessen der Oberfläche des Sees viel näher zu liegen, als sie wirklich sind, so dass man die Tiefe des Sees immer unterschätzt.

Die meisten Krystalle (z. B. Doppelspat) sind doppeltbrechend. Man erblickt also durch einen solchen Krystall auf einen leuchtenden Punkt blickend, statt desselben zwei leuchtende Bildpunkte.

3. Die Linsenwirkung.

§ 272. Eine grosse wissenschaftliche und praktische Bedeutung haben die optischen Linsen. Es sind dies Glasstücke mit sphärischen Oberflächen. Alle Strahlen eines Lichtbüschels, welches von einem leuchtenden Punkte ausstrahlt und durch eine Linse geht, werden von derselben gebrochen und bilden dann wieder ein Büschel, welches entweder durch einen Punkt geht, oder von einem Punkte herzukommen scheint. Die Linsen liefern Bilder leuchtender Gegenstände, welche je nach der Anordnung

kleiner oder grösser als die Gegenstände selbst sind. Betrachten wir diese Wirkung etwas genauer.

Eine Linse *L* (Fig. 164) mit nach aussen gewölbten Flächen (ein Brennglas, eine Lupe, ein Brillenglas für Weitsichtige) sammelt senkrecht auf sie auffallende parallele Strahlen (z. B. Sonnenstrahlen) in einem Punkte f_1, dem Brennpunkte der Linse. Auf der anderen Seite hat jede Linse den Brennpunkt in gleicher Entfernung d. h. wenn man von links Sonnenstrahlen auffallen lässt, so werden sie von der Linse in dem rechten

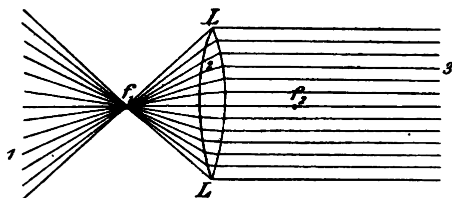


Fig. 164. Brennpunkt einer Linse.

Brennpunkte f_2 gesammelt. Umgekehrt wird ein Strahl *1* f_1 *2*, welcher durch einen Brennpunkt geht, ehe er auf die Linse fällt, von dieser so gebrochen, dass er senkrecht (parallel zur Axe f_1 f_2 der Linse) aus derselben austritt.

Eine Linse mit stark gekrümmten Flächen bricht die Strahlen stärker, so dass ihre Brennpunkte ihr sehr nahe liegen. Man verwendet zu verschiedenen Zwecken Linsen von sehr verschiedener Brennweite (Entfernung der Brennpunkte von dem Mittelpunkt der Linse) und zwar für astronomische Fernrohre Linsen bis zu 10 m Brennweite, für Miskroskope Linsen von $^1/_2$ mm Brennweite.

Ein Strahl, welcher durch den Mittelpunkt einer Linse geht, verlässt dieselbe unabgelenkt.

§ 273. Wenn man die Brennpunkte einer Linse ermittelt hat, so kann man ihre Wirkung immer leicht vorhersagen und die Bilder leuchtender Gegenstände, welche sie entwirft, konstruieren.

Die Linse Fig. 165, deren Brennpunkte bei f_1 und f_2 liegen, entwirft von einem Tannenbaum *a b* das verkleinerte, umgekehrte Bild *a' b'*. Der Strahl *a o*, welcher vom Wipfel *a* des Baumes durch den Mittelpunkt *o* der

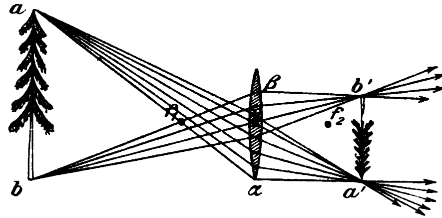


Fig. 165. Objektivwirkung.

Linse geht, tritt nämlich ungebrochen aus ihr aus. Der Strahl *a* f_1 *α*, welcher durch den Brennpunkt geht, tritt senkrecht aus ihr heraus. Diese beiden Strahlen schneiden sich in *a'*, und durch *a'* geht jeder Strahl, welcher von *a* auf die Linse fällt. Bei *a'* liegt das Bild des Wipfels *a*. Ebenso konstruiert man das Bild jedes beliebigen leuchtenden Punktes.

§ 274. Auch die vergrössernde Wirkung der einfachen Lupe können wir nun verstehen. Fig. 166 stelle die Lupe mit ihren Brennpunkten f_1 f_2 dar. Von dem kleinen Gegenstande *a b* fällt das Licht auf die Linse. Der von *a*

durch den Mittelpunkt der Linse gehende Strahl *a o* tritt ungebrochen aus derselben. Der senkrecht auf die Linse fallende Strahl *a α* geht in der Richtung αf_1 durch den Brennpunkt f_1. Diese gebrochenen Strahlen αf_1 und *o a* schneiden sich, nach rückwärts verlängert, in dem Punkte *a'*. Alle von *a* auf die Lupe fallenden Strahlen werden so gebrochen, als kämen sie von dem Punkte *a'*, dem Bilde des Punktes *a*. Ein von rechts in die Lupe blickendes Auge erblickt statt des Gegenstandes *a b* das aufrechte vergrösserte entfernte Bild *a' b'* desselben.

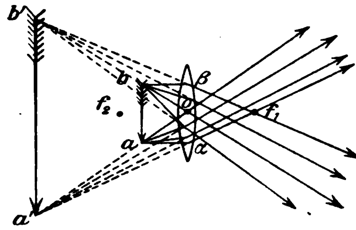


Fig. 166. Okularwirkung.

§ 275. Je stärker die Krümmung der Lupe ist, desto stärker vergrössert sie. Die Naturforscher des 17. Jahrhunderts verwendeten Linsen von sehr starker Krümmung, nämlich millimetergrosse Glastropfen. Mit diesen primitiven Lupen, welche eine ungefähr 50malige Vergrösserung bewirken, machte man die ersten mikroskopischen Entdeckungen. Sie stellten ungeheuere Anforderungen an die Geschicklichkeit und Ausdauer des Beobachters, lehrten aber eine neue Welt kleiner Pflanzen und Tiere kennen.

4. Das Mikroskop und das Teleskop.

§ 276. Eine Linse (Objektivlinse) entwirft, wie in Fig. 165 dargestellt ist, von einem entfernt stehenden

grossen Gegenstand *a b* ein sehr verkleinertes reelles Bild *a' b'* unmittelbar hinter ihrem Brennpunkte.

Umgekehrt entwirft sie von einem unmittelbar hinter ihrem Brennpunkte stehenden kleinen Gegenstande *a' b'* ein sehr vergrössertes reelles Bild *a b*.

Betrachtet man im ersten Falle das kleine Bild *a' b'* mit Hilfe einer Lupe (der Okularlinse), so bilden diese beiden Linsen (das Objektiv und das Okular) zusammen ein Fernrohr.

Betrachtet man im zweiten Falle das ohnehin schon sehr vergrösserte Bild *a b* (Fig. 165) des kleinen Gegenstandes *a' b'* noch mit Hilfe eine Lupe (dem Okular), so bilden diese beiden Linsen (das Objektiv und das Okular) zusammen ein Mikroskop.

Die Objektivlinse eines Fernrohrs ist sehr gross und flach, sie hat grosse Brennweite (von $^1/_2$ m bis 10 m). Es ist dann das Bild *a' b'*, welches in der Nähe des Brennpunktes derselben in dem Rohre des Fernrohres entsteht, nicht allzu klein. An Stelle der Okularlupe kann, um dieses Bild *a' b'* stärker zu vergrössern, ein Mikroskop verwendet werden.

Im Gegensatze hierzu muss die Objektivlinse des Mikroskopes möglichst kurze Brennweite haben.

§ 277. Fig. 167 zeigt den Durchschnitt der Linsen eines Fernrohres und Fig. 168 den Durchschnitt der Linsen eines Mikroskopes. Man sieht, das Objektiv und Okular nicht aus einzelnen Linsen bestehen, sondern aus Kombinationen mehrerer Linsen, welche sehr verschiedene Krümmungen haben und aus verschiedenen Glassorten

bestehen, zusammen aber wie eine Linse wirken. Diese Zusammensetzung der Linsen hat den Zweck, die Fehler ihrer Bilder zu beseitigen (Verkrümmung und Verzerrung

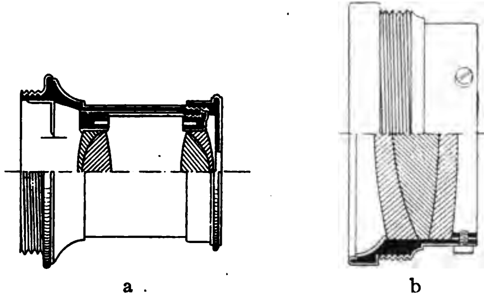


Fig. 167. Fernrohr.
a Durchschnitt durch das Okular.
b Durchschnitt durch das Objektiv (verkleinert).

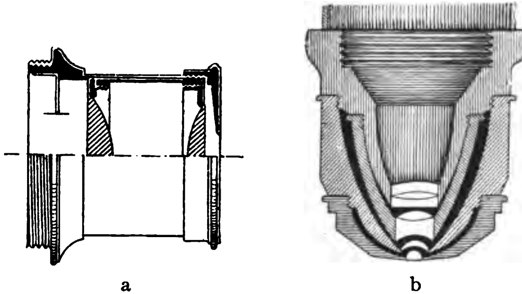


Fig. 168. Mikroskop.
a Durchschnitt durch das Okular.
b Durchschnitt durch das Objektiv.

des Bildes, Verwaschenheit der Konturen und farbige Ränder). Das Objektiv eines Mikroskopes enthält sechs bis acht Linsen von 2—4 mm Durchmesser, welche sehr verschiedene Formen haben und aus verschiedenen Glas-

sorten hergestellt und künstlich und genau gefasst sind. Ein solches mikroskopisches Objektiv, welches kaum einige Gramm wiegt, kann einen Wert von 400 Mark haben.



Fig. 169. Refraktor.

Fig. 169 zeigt ein modernes astronomisches Fernrohr mit seinem Stativ, seinen Bewegungsvorkehrungen und Teilkreisen. Fig. 170 zeigt die äussere Ausstattung eines

modernen Mikroskopes. Die heutigen Mikroskope geben bis 2000 fach vergrösserte scharfe Bilder. Die wunderbaren Entdeckungen in der organischen Natur, welche

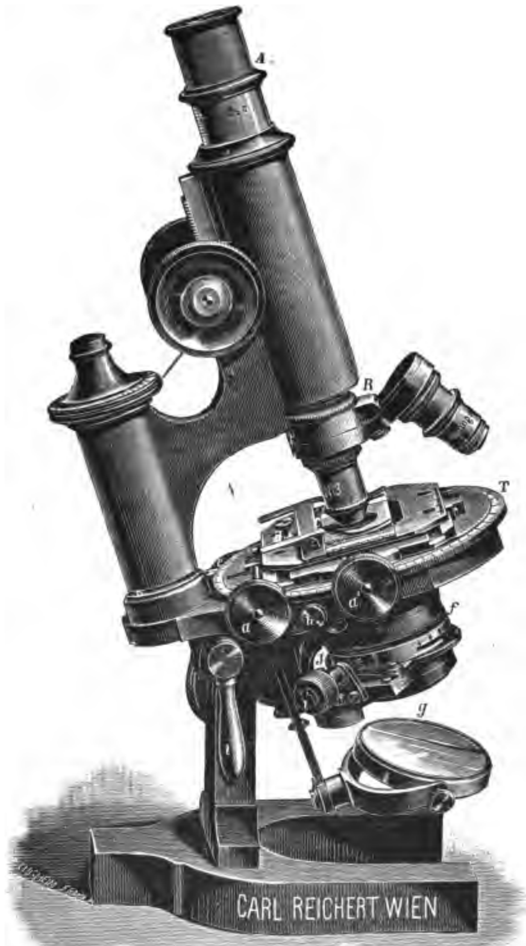


Fig. 170. Mikroskop.

das Mikroskop ermöglichte und noch ermöglichen wird, übersteigen alle Erwartungen und übertreffen jede Phantasie.

§ 278. Der Operngucker ist anders konstruiert als das Fernrohr. Er enthält als Okular statt einer Lupe ein sehr scharfes Brillenglas für Kurzsichtige (eine Konkavlinse). Die vergrössernde Wirkung dieser Kombination wurde zufällig entdeckt. Galilei wendete dieselbe als Erster zur Durchforschung des Himmels an und entdeckte vier Monde des Jupiter, die Phasen der Venus, die Sonnenflecken, Andeutungen des Saturnringes, erkannte, dass die Milchstrasse aus vielen lichtschwachen Sternen besteht u. s. w. Zu Kepler drang die unbestimmte Kunde von der Erfindung eines so mächtigen optischen Instrumentes. Er sann über die Möglichkeit eines solchen nach und erfand so das astronomische Fernrohr, welches oben beschrieben wurde und welches unvergleichlich leistungsfähiger ist, als der Galilei'sche Gucker.

5. Die periodische Natur des Lichtes.

§ 279. Wir wollen aus später zu erörternden Gründen von jetzt an oft das gelbe Licht zu unseren Experimenten verwenden, welches eine an sich nicht leuchtende Bunsengasflamme oder Spiritusflamme aussendet, wenn man etwas Kochsalz auf den Brenner streut und so Salzdämpfe in die Flamme bringt. Dieses gelbe Licht (Natriumlicht) ist eine einfachere Erscheinung als das gewöhnliche weisse Licht.

Seifenblasen erscheinen in weissem Lichte farbig, in

gelbem Lichte aber gelb mit vielen schwarzen Streifen. Wir tauchen einen Drahtrahmen in eine Seifenlösung, derselbe ist nach dem Herausziehen mit einer ebenen Seifenhaut überzogen, deren Dicke durch allmähliches Abrinnen der Lösung immer kleiner wird. Die Seifenhaut habe an einer Stelle die Dicke 100 μ (1 μ = $^{1}/_{1000}$ mm). Sie ist vollkommen durchsichtig und wir erblicken durch dieselbe die gelbe Flamme. Nun verkleinert sich die Dicke der Seifenhaut um $^{1}/_{10}$ μ ($^{1}/_{10000}$ mm), wobei dieselbe merkwürdigerweise immer undurchsichtiger und endlich fast undurchsichtig für das gelbe Licht wird. Verkleinert sich aber die Dicke der Seifenhaut noch weiter um $^{1}/_{10}$ μ so wird sie wieder durchsichtiger und endlich so durchsichtig wie anfangs. Verkleinert sich ihre Dicke weiter um $^{1}/_{10}$ μ, so wird sie wieder undurchsichtig für das gelbe Licht, bei nochmaliger Verkleinerung um $^{1}/_{10}$ μ wieder durchsichtig u. s. f.

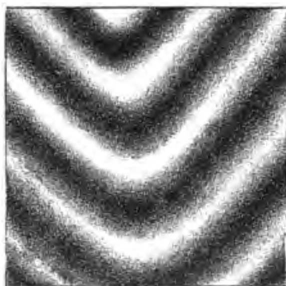


Fig. 171. Dünnes Blättchen im gelben Licht.

Da die Seifenhaut an verschiedenen Stellen etwas verschiedene Dicke hat, und zwar nach unten hin, wohin die Lösung abrinnt, immer dicker wird, so zeigt sie sowohl durchsichtige als undurchsichtige Stellen, abwechselnde gelbe und dunkle horizontale Streifen (Fig. 171). Im weissen Licht zeigt die Seifenhaut horizontale verschiedenfarbige Streifen (Interferenzstreifen).

Dieselben Interferenzstreifen kann man erhalten, wenn man zwei Spiegelglasplatten aufeinander drückt und durch dieselben die gelbe Flamme betrachtet. Der Raum zwischen den Platten kann durch eine Seifenlösung ausgefüllt sein, aber auch die dünne Luftschicht, welche sich jedenfalls zwischen den Platten befindet, verhält sich ganz ähnlich wie eine Seifenhaut. Eine Luftschicht von $10\,\mu$ ist durchsichtig, eine Luftschicht, welche $^1/_6\,\mu$ dünner ist, ist fast undurchsichtig, eine Luftschicht, welche noch um $^1/_6\,\mu$ dünner ist, ist wieder ganz durchsichtig u. s. w. Die beiden einfach gegen einander gedrückten Glasplatten erscheinen deshalb im gelben Licht von parallelen hellen und dunklen Streifen durchzogen, welche gewöhnlich an die Zeichnung der moirierten Seide erinnern.

§ 280. Diese Erscheinung entsteht durch das Zusammentreffen der von den verschiedenen Flächen der Glasplatten oder von den beiden Oberflächen der Seifenhaut reflektierten Anteile des durchfallenden gelben Lichtes. Man kann diesen Versuch übersichtlicher in folgender Form herstellen, welche allerdings feine Apparate erfordert.

Man stellt vier Glasplatten *I, II, III, IV* (Fig. 172) im Quadrat alle parallel zu einer Diagonale des Quadrates auf. Das Licht, welches von der gelben Flamme *f* kommt, gelangt auf zwei verschiedenen Wegen in das Auge *o*. Es geht 1. durch die Platte *I* und wird von *III* und *IV* reflektiert, und 2. wird es von *I* und *II* reflektiert und geht durch die Platte *IV*. Auf dem Wege *IVo* zum Auge mischen und verstärken sich die beiden

Lichtsrahlen, welche diese zwei Wege eingeschlagen haben, falls die Aufstellung wirklich genau symmetrisch ist. Verschiebt man dann aber eine der vier Platten um $^1/_6\ \mu$ senkrecht zu ihrer Ebene, so gelangt kein Licht mehr in das Auge. Nichtsdestoweniger kann man sich leicht (mittels eines weissen Schirmes) überzeugen, dass beide Lichtstrahlen bis zum Spiegel *IV* gelangen. Erst auf dem Wege zum Auge, wo sie sich mischen, zerstören sie sich gegenseitig. Hält man einen dieser Lichtstrahlen durch einen Schirm auf, welcher z. B. zwischen *I* und *III* gehalten wird, so gelangt der andere ins Auge. Beide Lichtstrahlen zusammen erzeugen aber Dunkelheit.

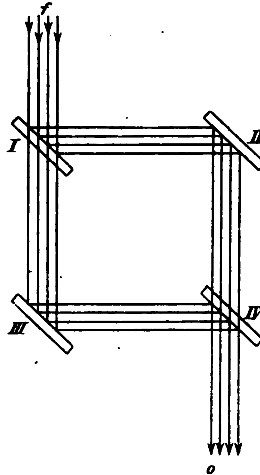


Fig. 172. Interferenzapparat.

Damit also die beiden Lichtstrahlen sich verstärken, müssen sie gleichlange Wege von ihrer Trennung bis zu ihrer Wiedervereinigung zurückgelegt haben. Ist der Weg des einen Strahles $^1/_3$, 1, $^5/_3$, $^7/_3\ \mu$ länger als der Weg des anderen Strahles, so heben sich die beiden Strahlen bei ihrer Vereinigung gegenseitig auf. Ist aber der Weg des einen Strahles um 0, $^2/_3$, $^4/_3$, $^6/_3\ \mu$ länger als der Weg des anderen Strahles, so verstärken sich die beiden Strahlen bei ihrer Vereinigung.

§ 281. Hieraus folgt unmittelbar, dass die Licht-

strahlen eine periodische Struktur haben und sich als Wellen fortpflanzen. Jeder Lichtstrahl muss in feine Querschichten oder Schnitten zerfallen, von welchen jede $^1/_3$ μ dick ist und in welchen abwechselnd zwei entgegengesetzte (positive und negative) Zustände oder Eigenschaften vorhanden sind. Lässt man dann zwei Strahlen zusammentreten, welche aus einem Strahle gespalten und wieder vereinigt wurden und während ihrer Trennung gleiche Wege zurückgelegt haben, so passen diese zwei Strahlen so aufeinander, dass überall die gleichen Lichteigenschaften zusammenfallen und die Strahlen sich also verstärken. Das gleiche findet statt, wenn die Strahlen um zwei Schichtenbreiten (um $^2/_3$ μ) gegen einander verschoben sind.

Hat jedoch der eine Strahl einen nur um $^1/_3$ μ längeren Weg zurückgelegt, so decken sich die beiden Strahlen dann so übereinander, dass überall die positiven Schichten des einen Strahles auf die negativen Schichten des anderen Strahles zu liegen kommen und die beiden Strahlen sich aufheben.

§ 282. Das Licht ist also eine Welle. Erinnern wir nun beispielsweise an die Schallwellen. Eine Schallwelle hat periodische Struktur. In gleichen Abständen (den Wellenlängen) findet sich derselbe Zustand (eine Luftverdichtung), dazwischen immer der entgegengesetzte Zustand (eine Luftverdünnung) und diese Verteilung pflanzt sich mit der Schallgeschwindigkeit fort.

Das Licht zeigt ein ganz ähnliches Verhalten, nur dass die Wellenlänge desselben ungemein kurz ist.

Die Wellenlänge des gelben Lichtes in Luft beträgt $^2/_3\ \mu = ^2/_{3000}$ mm. In Abständen von je $^2/_3\ \mu$ findet sich in einem gelben Lichtstrahl immer die positive Lichteigenschaft, und zwischen je zwei solchen positiven Schichten des Strahles ist immer eine negative Schicht eingeschaltet.

§ 283. Dass das Licht eine Welle, ähnlich den Schallwellen ist, erkannte Chr. Huyghens (1670). Diese Wellentheorie (Undulationstheorie) des Lichtes fand jedoch erst im 19. Jahrhundert Anerkennung. Auch heute noch, wo die Wellennatur des gewöhnlichen Lichtes ausser Zweifel steht, hat die Wellentheorie der neuen Strahlen (Röntgenstrahlen, Kathodenstrahlen) einen schweren Kampf zu bestehen.

6. Stehende Lichtwellen und Beugungsgitter.

§ 284. Die Lichtstrahlen haben nach obigem eine feine Querschichtung, welche sich bei dem Zusammenwirken (Interferenz) zweier Strahlen, die aus einem Strahle gespalten wurden (zwei cohärente Strahlen) und verschiedene Wege zurückgelegt haben, ehe sie vereinigt wurden, zu erkennen giebt.

Diese periodische Struktur der Lichtstrahlen wird noch unmittelbarer ersichtlich in folgenden Experimenten:

Lässt man einen Lichtstrahl *1 a*, Fig. 173, an einer Glasplatte *a a'* reflektieren, so entstehen durch das Zusammenwirken des einfallenden Strahles 1 *a* und des reflektierten Strahles *a 2* in der Nähe der reflektierenden Fläche stehende Lichtwellen. Es sind dies feine

dauernd dunkle der Glasplatte parallele Schichten, welche durch ebenso breite dauernd helle Schichten getrennt sind. Diese Schichten haben $^1/_3\ \mu$ Dicke, wenn der Lichtstrahl senkrecht auffällt und werden immer dicker, je schiefer das Licht reflektiert wird. Sie lassen sich auf photographischem Wege gut nachweisen (O. Wiener) und haben Bedeutung für das Problem der Photographie in natürlichen Farben.

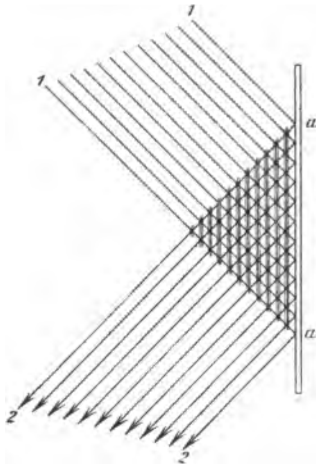
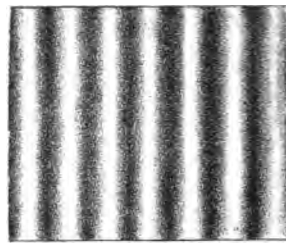


Fig. 173. Stehende Lichtwellen.


Fig. 174.
Teil eines Beugungsgitters, 1000 fach vergrössert, mit sinusförmiger Verteilung der Durchsichtigkeit.

§ 285. Sehr wichtig ist die Umkehrung dieses Experimentes. Sorgt man dafür, dass ein Lichtstrahl der Länge nach in dunkle und helle Streifen zerfällt, so spaltet er sich in zwei schief auseinander gehende Strahlen.

Ein Beugungsgitter (Fig. 174) ist eine durchsichtige Glasplatte, welche feine undurchsichtige Streifen trägt.

Nehmen wir an, dass die durchsichtigen Streifen ganz allmählich in die undurchsichtigen Streifen übergehen und

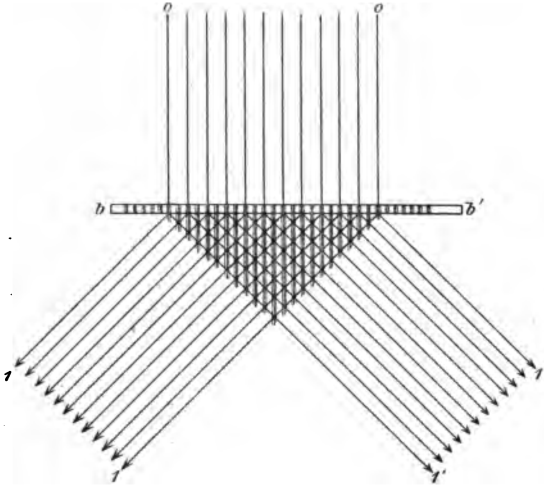


Fig. 175. Beugung erster Ordnung.

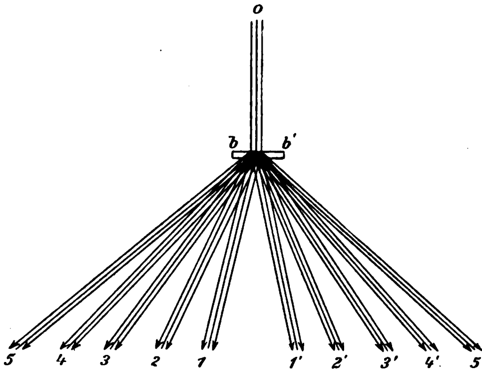


Fig. 176. Beugungen höherer Ordnung.

dass diese Streifen $^2/_3\ \mu$ breit sind. Ein durch dieses Gitter *b b'* fallender gelber Strahl *o b*, Fig. 175, spaltet

sich in zwei Strahlen *1 1* und *1' 1'*, welche um 60° auseinander gehen.

Ist das Gitter breiter gestreift, so divergieren die beiden Strahlen weniger.

Ist der Übergang der Durchsichtigkeit von Streifen zu Streifen kein so allmählicher (sinusförmiger), so spaltet sich der einfallende Strahl in viele Strahlen (Fig. 176), *1, 1', 2, 2', 3, 3'* u. s. w., welche je nach der Zeichnung des Gitters sehr verschiedene Lichtstärke haben können. Sind die undurchsichtigen Streifen nirgends völlig undurchsichtig, so geht auch ein Teil des einfallenden Lichtstrahles ungebeugt durch das Gitter.

All dies tritt immer bei den Beugungsgittern ein, deren Streifung man einfach dadurch herstellt, dass man mit dem Diamanten und der Teilmaschine viele parallele Linien (von $^1/_{500}$ mm bis $^1/_{1000}$ mm Distanz, von welchen also 14000 bis 20000 auf den englischen Zoll kommen) auf eine Glasplatte einritzt.

7. Die Seitlichkeit (Polarisation) des Lichtes.

§ 286. Ein Lichtstrahl, welcher einmal durch einen Krystall gegangen ist, ja welcher nur einmal von einer Glasscheibe reflektiert worden ist, ist kein gewöhnliches Licht mehr, sondern polarisiertes Licht. Er hat seitliche, quergerichtete Eigenschaften angenommen, er ist gewissermassen querfaserig wie eine lange Schachtel voll querliegender Zündhölzchen.

Die einfachste polarisierende Wirkung hat eine Krystallplatte, welche aus einem Turmalinkrystalle, der ein

langes sechsseitiges Prisma bildet, so herausgeschnitten ist, dass ihre Fläche der Axe des Prismas (der Krystallaxe) parallel ist.

Die Turmalinplatten sind für gewöhnliches Licht durchsichtig. Lässt man das Licht senkrecht durch zwei hintereinander stehende Turmalinplatten gehen, deren Krystallaxen parallel stehen, so ist es schon nach dem Durchtritt durch die erste Platte polarisiert. Man erkennt die Seitlichkeit dieses Lichtes daran, dass es ungeschwächt nur mehr durch Turmalinplatten geht, deren Axen jener der ersten Turmalinplatte parallel stehen. Dreht man die zweite Turmalinplatte in ihrer Fläche um 90°, so ist sie für dieses polarisierte Licht vollkommen undurchsichtig. Das zwischen beiden Platten übergehende Licht bewahrt also die Erinnerung an die Orientierung der Krystallaxe der ersten Turmalinplatte in Form irgend einer quergerichteten Eigenschaft, die es bei dem Durchgange durch diese Platte angenommen hat.

§ 287. Lässt man einen Lichtstrahl von einer Glasplatte spiegeln, am besten unter solchem Einfallswinkel, dass der reflektierte und gebrochene Strahl auf einander senkrecht stehen (Fig. 177), so ist der reflektierte Strahl polarisiert. Er geht ungeschwächt durch eine Turmalinplatte nur bei einer gewissen Orientierung derselben (wenn die Krystallaxe der Glasplatte parallel ist). Dreht man den Krystall dann in seiner Fläche um 90°, so ist er für den reflektierten Strahl ganz undurchlässig.

§ 288. Das polarisierte Licht hat quergerichtete Eigenschaften. Die Eigenschaft oder der Zustand, dessen

periodischer Wechsel die Lichtwelle ausmacht, ist also keine richtungslose Eigenschaft, wogegen z. B. die Luftdichte im Schallstrahl eine periodisch wechselnde aber richtungslose Eigenschaft ist.

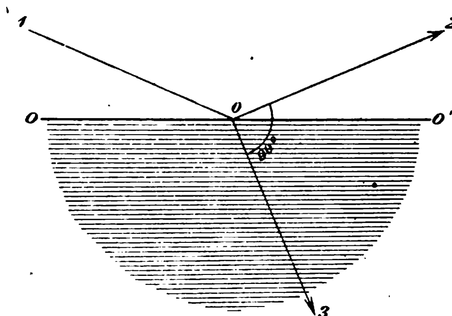


Fig. 177. Polarisation durch Reflexion.

Die periodisch wechselnde Lichteigenschaft (siehe § 281) ist vielmehr eine gerichtete und zwar eine quer gegen die Strahlrichtung gerichtete Eigenschaft. Bezeichne in Fig. 178 *o 1* die Fortpflanzungsrichtung eines

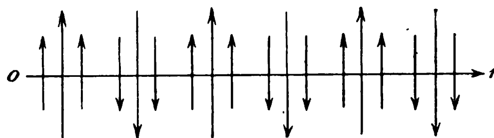


Fig. 178. Polarisierter Lichtstrahl (schematisch).

polarisierten Lichtstrahles, so deuten die quergerichteten Pfeile die periodisch wechselnde Richtung der Lichteigenschaft an. Die Wellenlänge ist freilich in Fig. 178 viel zu gross dargestellt, sie beträgt nur einige Zehntausendstel Millimeter. Das ganze Bild Fig. 178 muss

man sich mit der Lichtgeschwindigkeit nach rechts fortbewegt denken, um eine Vorstellung von der quergerichteten Welle zu haben.

Das Licht ist eine solche Querwelle (Transversalwelle). Diese Erkenntnis verdanken wir Fresnel (1820). Die Schallwellen sind keine Transversalwellen, sondern Longitudinalwellen oder Längswellen, insofern die Luft in einem Schallstrahl in der Richtung dieses Strahles schwingt.

Die Hertz'schen Strahlen (§ 249) sind jedoch Transversalwellen. Die elektrischen Strömungen in einem solchen Hertz'schen Strahle sind periodisch abwechselnd und quergerichtet.

8. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes.

§ 289. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes ist ungemein gross. Dennoch wusste man dieselbe bereits im Jahre 1670 aus astronomischen Beobachtungen zu bestimmen. Die Monde des Planeten Jupiter, deren Umlauf für die Seefahrer von Interesse ist, weil sie nach diesen regelmässigen Umläufen ihre Uhren richten, lassen doch in diesen Umläufen eine merkwürdige Ungleichheit erkennen. Immer dann, wenn der Jupiter um Mitternacht culminiert, wenn er also der Erde am nächsten ist (Fig. 179), treten die Umläufe der Jupitermonde mit einer Verfrühung von $8^1/_2$ Minuten ein. Wenn hingegen der Jupiter hinter der Sonne steht, also um den ganzen Durchmesser der Erdbahn (siehe Fig. 180) weiter von der Erde entfernt ist als im vorigen Falle, dann zeigen die Umläufe des Jupiter eine Verspätung

von $8^1/_2$ Minuten. Olaf Römer erkannte die Ursache dieser Abweichungen darin, dass das Licht $8^1/_2$ Minuten braucht, um den Halbmesser der Erdbahn zu durchlaufen.

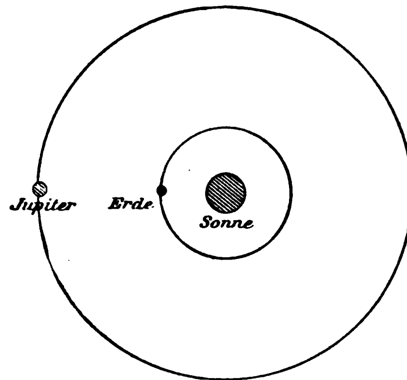


Fig. 179. Jupiter in Erdnähe.

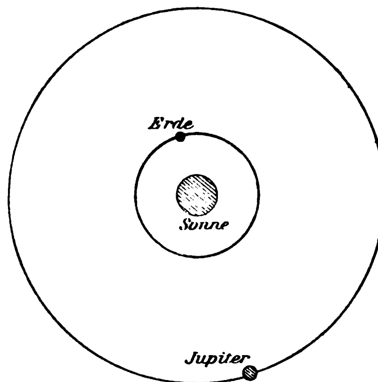


Fig. 180. Jupiter in Erdferne.

Da dieser 159 Millionen Kilometer lang ist, so durchläuft also das Licht in jeder Sekunde 300000 Kilometer.

§ 290. In unserem Jahrhundert wurde auf mehrfache Art die schwierige Aufgabe gelöst, die Lichtgeschwindigkeit in irdischen Distanzen, ja sogar im Laboratorium zu bestimmen. Man erhielt immer die bereits von Olaf Römer auf astronomischem Wege bestimmte Zahl.

Es ist sehr bemerkenswert, dass die Hertz'schen Strahlen genau dieselbe Fortpflanzungsgeschwindigkeit haben, wie das Licht (siehe § 260).

§ 291. In anderen Stoffen als Luft pflanzt sich das Licht mit anderer Geschwindigkeit fort, und zwar in den optisch dichteren Stoffen mit kleinerer Geschwindigkeit. Die Ursache der Brechung eines Lichtstrahles, welcher z. B. aus Luft in Glas eintritt, ist, dass das Licht sich in Glas mit viel kleinerer Geschwindigkeit fortpflanzt. Das Licht schreitet nämlich immer auf jenem Wege von einem Punkte *1* (in Luft) zu einem Punkte *3* (in Glas), Fig. 181, fort, auf welchem es in kürzester Zeit ankommt, und dieser Weg ist keineswegs der geradlinige, da sich das Licht in Glas viel langsamer bewegt.

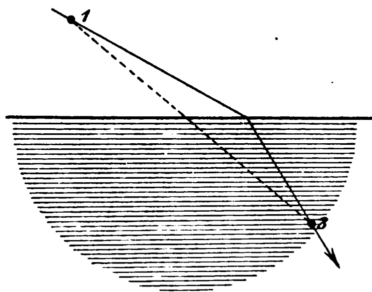


Fig. 181. Brechung des Lichtes.

Aus dem Winkel, um welchen das Licht beim Eintritt in einen anderen Stoff gebrochen wird, kann man die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes in diesem Stoffe

berechnen. Es zeigt sich, dass das Licht, um 300000 Kilometer zurückzulegen, folgende Zeit brauchen würde:

in Luft:	1 Sekunde
in Wasser:	1,33 Sekunden
in Benzol:	1,5 Sekunden
in leichtem Glas:	1,5 Sekunden
in schwerem Glas:	1,7 Sekunden
in Silicatflintglas:	2,0 Sekunden
in Diamant:	2,47 Sekunden

Diese Zahlen nennt man die Brechungsexponenten der betreffenden Substanzen.

Die Hertz'schen Strahlen pflanzen sich nicht nur in Luft sondern in allen Substanzen nahezu mit derselben Geschwindigkeit fort, wie das Licht.

9. Schwingungsdauer des gelben Lichtes.

§ 292. Die Wellenlänge des gelben Lichtes beträgt $^2/_{3000}$ mm. In dieser Strecke wechselt die Lichteigenschaft einmal aus dem Positiven in das Negative.

Das Licht legt in der Sekunde 300 000 Kilometer zurück. Auf dieser Strecke liegen also nicht weniger als 4500 Billionen Lichtwellenlängen. Diese ungeheure Zahl von Lichtwellen passiert in jeder Sekunde jeden Ort, welchen der Lichtstrahl passiert. An jedem dieser Orte wechselt also die Lichteigenschaft ebenso oft oder finden 4500 Billionen Lichtschwingungen pro Sekunde statt.

Gegen diese Zahl verschwindet selbst die grosse Schwingungszahl der Hertz'schen Strahlen. Auch unsere kleinsten Oscillatoren geben nicht mehr als $^1/_{10}$ Billion Schwingungen in der Sekunde (vergl. § 260).

ZWÖLFTE VORLESUNG.

Die elektromagnetischen Strahlen.

1. Elektromagnetische Natur des Lichtes.

§ 293. Fresnel hielt die Lichtschwingungen noch für elastische Schwingungen eines hypothetischen Stoffes, des Lichtäthers.

Von Faraday rührt der Gedanke her, dass das Licht kein Bewegungsvorgang, sondern ein elektromagnetischer Vorgang ist. Er suchte und fand mehrere enge Beziehungen zwischen Elektrizität, Magnetismus und Licht.

Schwefelkohlenstoff, Chloroform und viele andere Flüssigkeiten erlangen, wenn sie von einer starken elektrischen Strömung durchflossen werden, die optischen Eigenschaften eines Krystalles, dessen Krystallaxe die Richtung der elektrischen Strömung hat. Polarisiertes Licht, welches senkrecht zu der elektrischen Strömung diese Flüssigkeiten passiert, erfährt in denselben sehr merkliche Veränderungen. Ein natürlicher Lichtstrahl spaltet sich beim Eintritt in diese von einer elek-

trischen Strömung durchflossenen Flüssigkeiten in zwei Strahlen von verschiedener Polarisationsrichtung (elektrische Doppelbrechung).

§ 294. Schwefelkohlenstoff und viele andere Flüssigkeiten erlangen, wenn sie von einer starken magnetischen Strömung durchflossen werden, nahezu die eigentümliche optische Wirkung eines Quarzkrystalles, dessen Axe parallel der magnetischen Strömung liegt. Polarisiertes Licht, welches in der Richtung der magnetischen Strömung diese Flüssigkeiten passiert, erfährt dieselbe Änderung (Drehung der Polarisationsrichtung), wie beim Durchgang durch einen Quarzkrystall in der Richtung der Krystallaxe. Besonders stark wird die Polarisationsrichtung des Lichtes gedreht, wenn dasselbe durch ein dünnes Eisenblättchen in der Richtung einer starken magnetischen Strömung geht.

§ 295. Eine interessante Beziehung zwischen Magnetismus und Licht hat in neuerer Zeit Zeeman entdeckt. Die gelbe Natriumflamme sendet in einem kräftigen magnetischen Felde Licht von ein wenig geänderter Farbe und eigentümlicher Polarisationsart aus.

§ 296. Das Licht hat ferner einen grossen Einfluss auf die elektrische Entladung, und zwar denselben entladungsfördernden Einfluss, welchen auch elektrische Schwingungen (vergl. § 148) und Hertz'sche Strahlen haben.

Beleuchtet man die negative Elektrode einer Funkenstrecke, so tritt die Entladung schon bei schwächerer elektrischer Strömung ein, als in der unbeleuchteten Funkenstrecke.

Besonders deutlich ist diese Wirkung bei der Entladung in verdünnter Luft und wenn die Elektrode aus Kalium- oder Natriummetall besteht.

§ 297. Maxwell hat darauf hingewiesen, dass das Licht genau dieselbe Fortpflanzungsgeschwindigkeit hat, wie die von ihm vorausgesagten elektromagnetischen Strahlen, welche Hertz 25 Jahre später herstellte und untersuchte.

Nicht nur in Luft, sondern auch in vielen durchsichtigen nichtleitenden Stoffen haben die Hertz'schen Strahlen dieselbe Fortpflanzungsgeschwindigkeit (siehe § 291) wie das Licht, sie werden also beim Eintritt in diese Stoffe nahezu ebenso stark gebrochen als das Licht.

§ 298. Das Licht hat also nachweislich alle wesentlichen Eigenschaften der Hertz'schen Strahlen, so dass man sicher geht, wenn man die Lichtstrahlen für transversale elektromagnetische Strahlen hält.

Ein grosser, aber blos quantitativer Unterschied besteht in den Wellenlängen. Die Hertz'schen Strahlen haben Wellenlängen von 10 m bis 3 mm Länge. Noch kürzere Hertz'sche Wellen herzustellen, würde auf beträchtliche technische Schwierigkeiten stossen.

Die Wellenlänge des gelben Lichtes ist aber 4500 mal kleiner. Die Lichtstrahlen sind also äusserst kurzwellige, ungemein rasch schwingende elektromagnetische Strahlen.

Es giebt übrigens auch Lichtstrahlen von sehr verschiedener Wellenlänge, und über diese wollen wir uns nun unterrichten.

2. Die Lichtstrahlen verschiedener Farbe.

§ 299. Wir haben bisher zu Interferenzexperimenten nur das gelbe Natriumlicht benutzt.

Wiederholen wir diese Experimente (§ 279 bis § 285) nun mit dem roten Licht, welches eine Lithiumflamme aussendet. Als solche Flamme kann jede an sich nicht leuchtende Flamme dienen, deren Brenner mit Lithiumsalz bestreut ist, so dass Lithiumdämpfe in die Flamme gelangen.

Dieses rote Licht zeigt bei denselben Versuchen breitere helle und dunkle Interferenzstreifen (§ 279) als das gelbe Licht. Die Wellenlänge des roten Lichtes bestimmt sich hiernach zu 0,00067 mm, während das gelbe Licht die Wellenlänge 0,00059 mm hat.

Bringen wir Dämpfe eines Thalliumsalzes in die Flamme, so leuchtet dieselbe rein grün. Die Interferenzstreifen des grünen Lichtes sind enger als die des gelben Lichtes. Das grüne Licht hat die Wellenlänge 0,00053 mm.

Lassen wir Sonnenlicht durch eine wässerige Lösung von Ammoniumcuprat gehen, welche tiefblau ist, so erhalten wir rein blaues Licht. Dieses giebt noch engere Interferenzstreifen als das grüne Licht und hat also eine kürzere Wellenlänge. Die Wellenlänge des blauen Lichtes beträgt 0,00046 mm. Rein violettes Licht hat die noch kleinere Wellenlänge 0,00039 mm.

§ 300. Diese verschiedenfarbigen Lichtstrahlen werden also auch durch eine verschiedene Wellen-

länge charakterisiert. Schon ein kleiner Unterschied in der Wellenlänge bedingt eine ganz andere physiologische Wirkung, eine ganz andere Farbe des Lichtes.

3. Fortpflanzungsgeschwindigkeit der verschiedenen Lichtstrahlen.

§ 301. Die verschiedenfarbigen Lichtstrahlen haben in Luft fast ganz genau dieselbe Fortpflanzungsgeschwindigkeit. Anders aber in festen und flüssigen Stoffen. In den meisten derselben pflanzen sich die Lichtstrahlen kürzerer Wellenlänge langsamer fort als die Lichtstrahlen grösserer Wellenlänge. Stoffe, welche hiervon eine Ausnahme machen, heissen anomal dispergierende Stoffe.

Man erkennt diese verschiedene Fortpflanzungsgeschwindigkeit am einfachsten an der verschiedenen Brechbarkeit der verschiedenfarbigen Lichtstrahlen. Rote Lichtstrahlen werden beim Durchtritt durch die Oberfläche von Wasser, Öl, Glas u. s. w. schwächer gebrochen als gelbe, diese werden schwächer gebrochen als grüne Strahlen, am stärksten werden die violetten Strahlen gebrochen. Hieraus folgt nach § 291, dass diese violetten Strahlen in Wasser, Öl, Glas u. s. w. eine kleinere Fortpflanzungsgeschwindigkeit haben als alle anderen Lichtfarben.

§ 302. Wir haben bisher noch nicht von weissem Licht gesprochen. Lässt man Sonnen- oder Lampenlicht auf eine Wasser- oder Glasoberfläche fallen, so tritt statt des gebrochenen Strahles das Spektrum, d. h. ein Fächer verschiedenfarbiger Strahlen auf, und zwar erscheinen alle Regen-

bogenfarben vom roten Strahl (Fig. 182), welcher am wenigsten gebrochen ist, durch gelb, grün und blau bis zum violetten Strahl, welcher am stärksten gebrochen ist.

Führt man eines der Interferenzexperimente (§ 279 bis § 285) mit weissem Licht aus, so erhält man nicht helle und dunkle Streifen, sondern farbige Streifen und zwar erscheinen alle von den Seifenblasen her be-

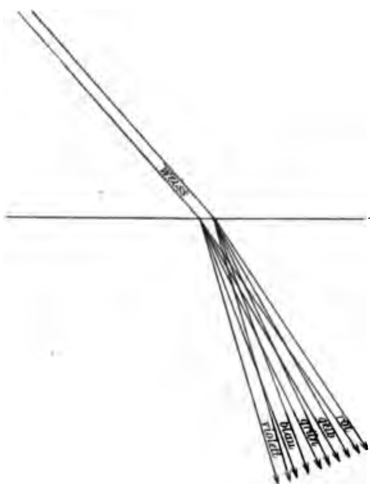


Fig. 182. Brechung und Dispersion des weissen Lichtes.

kannten Farben. Da die verschiedenen Lichtfarben verschiedene Wellenlänge haben, werden sie von einem Beugungsgitter (§ 285) verschieden stark gebeugt und ein weisser Lichtstrahl spaltet sich beim Durchtritte durch das Gitter in mindestens zwei Farbenfächer oder Spektra.

Es folgt aus alledem, dass das weisse Licht eine wesentlich andere Erscheinung ist, als die farbigen Licht-

strahlen, und dass man einen weissen Lichtstrahl in verschiedenfarbige Strahlen zerlegen kann (Dispersion des weissen Lichtes, Hooke und Newton).

Das weisse Licht kann also, obwohl es eine ganz andere physiologische Wirkung, eine ganz andere Farbe hat, objektiv als die Summe aller Regenbogenfarben aufgefasst werden.

Übrigens hat schon die Mischung von rotem mit grünem Licht, oder auch die Mischung von orangefarbigem und blauem Licht oder endlich von gelbem mit violettem Licht die physiologische Wirkung des weissen Lichtes, obwohl diese Mischungen von dem weissen Sonnenlicht physikalisch d. i. objektiv sehr verschieden sind. Das weisse Sonnenlicht ist aber nicht etwa in Wirklichkeit nichts anderes als eine Mischung aller Regenbogenfarben, so wenig, als eine Silberkrone die Summe von 100 Kupferhellern ist. Das weisse Licht ist nur den Regenbogenfarben äquivalent, es kann leicht in dieselben verwandelt werden.

4. Die Spektralanalyse.

§ 303. Um Licht in die Regenbogen- oder Spektralfarben zu zerlegen, verwendet man den Spektralapparat Fig. 183.

Das zu zerlegende Licht fällt auf ein Glasprisma *P*, wird von demselben aus seiner Richtung abgelenkt und dabei in einem Fächer von Spektralfarben zerlegt. Um diese scharf getrennt nebeneinander zu erhalten, lässt man das einfallende Licht durch einen schmalen Spalt *s*

gehen und entwirft mittels der Linsen l_1 und l_2 ein scharfes Bild dieses Spaltes bei *s'*.

Rotes Lithiumlicht liefert wirklich bei *s'* ein scharfes Bild des Spaltes (Fig. 184b). Das gelbe bezw. grüne Spaltbild bei Natrium- bezw. Thalliumlicht zeigen Fig. 184a und d. Das blassviolette Kaliumlicht besteht aber aus rotem und blauem Licht, von welchem das letztere stärker gebrochen wird. Man erhält ein rotes und ein blaues Bild des Spaltes, welche weit getrennt sind (siehe Fig. 184c).

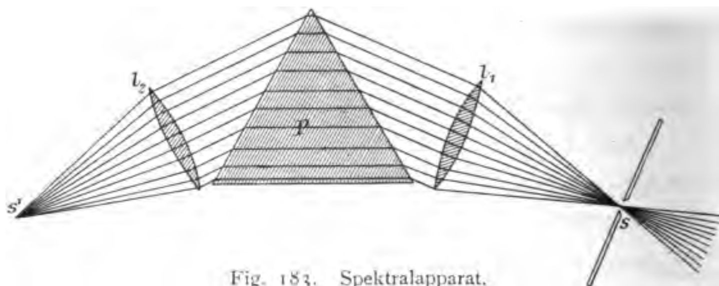


Fig. 183. Spektralapparat.

Die rote Kaliumlinie erscheint nicht an derselben Stelle, wie die rote Lithiumlinie, weil das rote Kaliumlicht eine etwas grössere Wellenlänge hat als das rote Lithiumlicht und weniger stark gebrochen wird. Es zeigt auch physiologisch eine etwas dunklere Färbung. Das Spaltbild (Spektrum), welches der Spektralapparat entwirft, wenn man das Licht glühenden Wasserstoffgases untersucht, enthält eine rote, eine blaugrüne und eine blaue Linie (Fig. 184e). Das Spektrum glühenden Sauerstoffgases enthält viele Linien in allen Farben (Fig. 184f).

Das Licht, welches glühende Gase aussenden, ist also eine wirkliche Mischung einiger oder vieler Spektralfarben.

Erhöht man aber den Druck der glühenden Gase, so werden die Spektrallinien breiter und verwaschener. Das Licht der verbreiterten Lithiumlinie kann nun nur mehr als die Summe sehr vieler, wenig von einander verschiedener roter Farben aufgefasst werden,

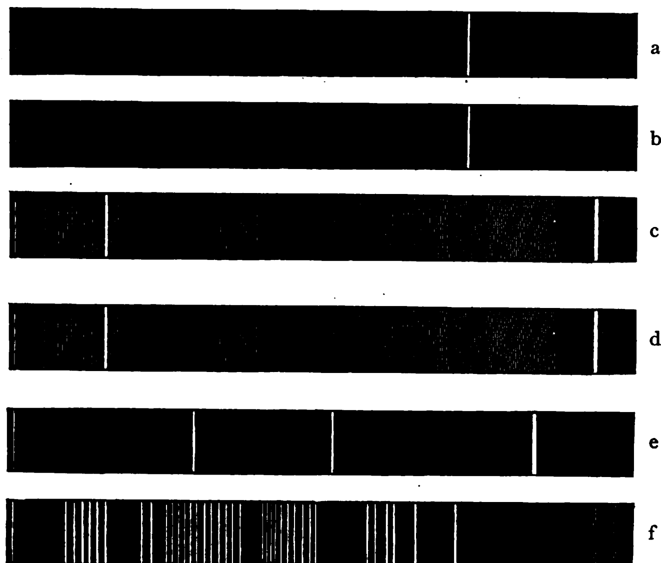


Fig. 184. Spektra glühender Gase.

insofern man die verbreiterte Linie als die Summe vieler, unmittelbar neben einander liegender Linien auffassen kann.

Glühende Gase unter hohem Druck, ferner glühende, feste und flüssige Körper, also auch Gas- und Petroleumflammen, in welchem nicht die Gase, sondern der Russ glüht und leuchtet, senden weisses Licht aus, welches als

Summe aller Spektralfarben aufgefasst werden kann, und ein vollständiges Spektrum liefert.

§ 304. Man kann also aus dem Lichte, welches ein glühendes Gas aussendet, wenn man dasselbe im Spektralapparat untersucht, auf die Natur des Gases schliessen (Spektralanalyse von Bunsen und Kirchhoff). Bringt man z. B. eine kleine Menge eines unbekannten Salzes in eine Flamme und zeigt es sich, dass das Licht dieser Flamme nun die bekannte gelbe Linie und ausserdem die rote und blaue Kaliumlinie liefert, so enthält das Salz Natrium und Kalium.

Viele neue Metalle wurden auf diesem Wege entdeckt, indem man in den mit verschiedenen Salzen gefärbten Flammen vorher unbekannte Spektrallinien auffand. So führte die Entdeckung der grünen Thalliumlinie zur Entdeckung des Thalliummetalls, ebenso wurden die Metalle Indium, Cäsium und Rubidium entdeckt.

§ 305. Ein heisses Gas absorbiert eben dasselbe Licht, welches es auszusenden imstande ist (Kirchhoff). Lässt man weisses Licht durch eine Natriumflamme gehen, so wird das gelbe Natriumlicht von der Flamme absorbiert und in dem Spektrum (Fig. 185b) erscheint dann im Gelb eine schwarze Linie, welche genau die Lage der gelben Natriumlinie hat.

Fig. 185a zeigt das Spektrum des Sonnenlichtes mit den schwarzen Fraunhofer'schen Linien. Aus der Lage dieser Linien kann man schliessen, was für Gase in der Sonnenatmosphäre vorhanden sind, durch welche das weisse Sonnenlicht dringen muss, ehe es zu uns kommt. Man

erkennt im Sonnenspektrum die schwarze Natriumlinie im Gelb, die drei schwarzen Wasserstofflinien im Rot, Blaugrün und Blau, viele Eisenlinien u. s. w.

Ähnliche Absorptionsspektra zeigen die Fixsterne.

Hingegen zeigen die Kometen das Spektrum glühenden Leuchtgases oder Petroleums, die Nebelflecken das Spektrum glühenden Wasserstoffs.

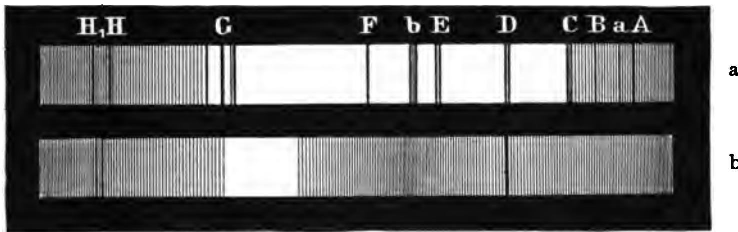


Fig. 185. Absorptionsspektra.

In dem Sonnenspektrum, in dem Spektrum mancher Nebelflecken und des Nordlichtes kannte man seit langem die Linie eines unbekannten Stoffes: des Heliums, welches Gas erst in neuester Zeit in irdischen Substanzen entdeckt und aus demselben rein dargestellt wurde.

Man benutzt gegenwärtig zur Zerlegung des Lichtes nicht mehr Prismen, sondern Beugungsgitter (§ 302).

5. Die ultraroten oder Wärmestrahlen.

§ 306. Bei 500^0 Celsius beginnen die meisten Körper rot zu glühen. Aber auch bei niedrigerer Temperatur senden sie bereits Strahlen aus: die Wärmestrahlen. Dieselben sind unsichtbar, aber durch ihre Wärmewirkung sehr leicht fühlbar. Auch mittels eines berussten

Thermometers, welches unter ihrer Wirkung sehr deutlich steigt, kann man sie nachweisen. Sie gehen nicht durch Holz, Papier, Metall. Daher die Wirkung der Ofenschirme, welche uns vor den heftigen Wärmestrahlen schützen, welche der warme Ofen aussendet. Diese Strahlen pflanzen sich geradlinig fort, wie man leicht mittels Schirmen nachweisen kann. Sie werden reflektiert und gebrochen, aber noch weniger stark gebrochen als das rote Licht. Auch die Interferenzexperimente gelingen mit Wärmestrahlen, so dass man nicht zweifeln kann, dass dieselben nichts anderes sind als Lichtstrahlen grösserer Wellenlänge. Thatsächlich erscheinen sie in jedem vollständigen Spektrum ausserhalb des roten Endes desselben und sind dort durch ihre Wärmewirkung, übrigens auch durch ihre wenn auch schwache Fluoreszenzwirkung und photographische Wirkung nachweisbar.

Für die Wärmestrahlen ist Glas und Wasser undurchlässig, Hartgummi jedoch vollständig durchlässig.

6. Das ultraviolette Licht.

§ 307. Entwirft man ein Spektrum auf einem mit dem gelben Platinbariumcyanür bestrichenen Papierschirm, so zeigt sich, dass noch weit ausserhalb des violetten Endes des Spektrums unsichtbares Licht vorhanden ist.

Das Cyanür hat die Eigenschaft, unter dem Einflusse dieses unsichtbaren ultravioletten Lichtstrahlen in (kalte) Grünglut (Fluoreszenz) zu geraten. Es leuchtet dort

hellgrün, wo es von dem unsichtbaren ultravioletten Licht getroffen wird.

Auch eine starke photographische Wirkung haben diese unsichtbaren ultravioletten Lichtstrahlen. Dieselben haben alle Eigenschaften des Lichtes, sie pflanzen sich geradlinig fort, werden jedoch durch die meisten Stoffe stark absorbiert. Von den festen Stoffen absorbiert Quarz und Flussspat die ultravioletten Lichtstrahlen noch am wenigsten. Sie werden stärker gebrochen, als das

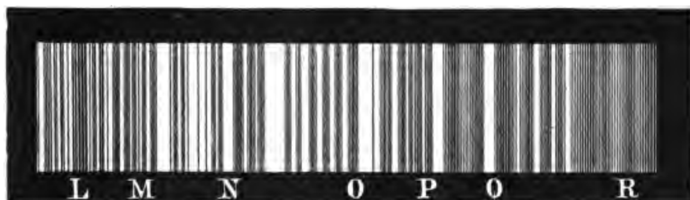


Fig. 186. Ultraviolettes Sonnenspektrum.

violette Licht und Interferenzexperimente lehren, dass die ultravioletten Strahlen eine noch kleinere Wellenlänge als das violette Licht haben.

Fig. 186 zeigt eine Photographie des ultravioletten unsichtbaren Endes des Sonnenspektrums.

7. Die Röntgenstrahlen.

§ 308. Glas oder Metall, welches von Kathodenstrahlen (siehe diese, § 310) getroffen wird, fluoresziert und sendet ausser sichtbarem grünen oder blauen Licht und ultraviolettem Licht auch Röntgenstrahlen aus. Diese unterscheiden sich von ultraviolettem Licht dadurch, dass sie die meisten Stoffe leicht durchdringen.

leichter sogar, als dies das sichtbare Licht vermag. Nur Metalle sind für Röntgenstrahlen wenig durchlässig. Ferner unterscheiden sich dieselben von dem Licht dadurch, dass sie beim Eintritt in keinen festen oder flüssigen Stoff gebrochen werden.



Fig. 187. Schatten einer Hand bei Röntgenbeleuchtung.

Sonst haben sie alle Eigenschaften des ultravioletten Lichtes, eine starke photographische Wirkung und eine starke Fluoreszenzwirkung. Ein Platinbariumcyanürschirm leuchtet hellgrün, wenn er von Röntgenstrahlen getroffen wird, und man kann dann auf demselben den Schatten von Gegenständen, die für die

Röntgenstrahlen weniger durchlässig sind, z. B. einer Hand mit ihren Knochen, sehen (Fig. 187). Den Röntgenstrahlen ist auch die entladungsfördernde Wirkung des ultravioletten Lichtes in hohem Grade eigen.

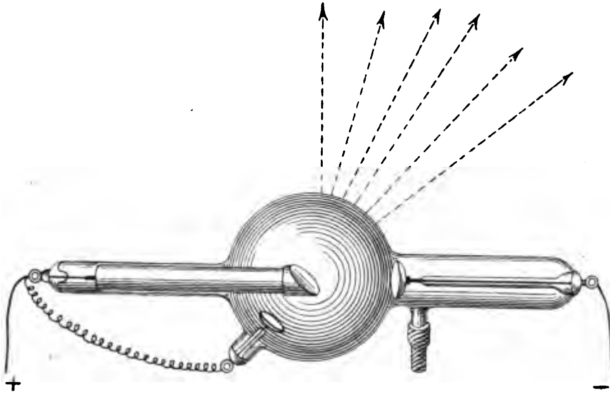


Fig. 188. Röntgenröhre.

Dass ihre Brechbarkeit und Absorbierbarkeit viel kleiner ist als die des gewöhnlichen Lichtes, hindert keineswegs, sie für eine Art Licht zu halten, und zwar ist es wahrscheinlich, dass sie Lichtstrahlen äusserst kleiner Wellenlänge sind.

8. Die Becquerelstrahlen.

§ 309. Das Uranpecherz und mit besonderer Stärke einige aus diesem Erze gefertigte Präparate (radioaktive Substanzen) haben die Eigenschaft, dauernd eigentümliche unsichtbare, von Becquerel (1895) entdeckte Strahlen auszusenden.

Die Strahlen, welche einige dieser Präparate aussenden,

haben alle Eigenschaften der Röntgenstrahlen und haben wie diese photographische Wirkung, erregen ziemlich starke Fluoreszenz und haben eigentümliche entladende Wirkungen.

Andere dieser radioaktiven Substanzen senden jedoch Strahlen aus, die sich wesentlich von den Lichtstrahlen und Röntgenstrahlen dadurch unterscheiden, dass sie in kräftigen magnetischen Feldern krummlinig verlaufen, also von einem Magnete abgelenkt werden, eine Eigenschaft, die sich ausser bei diesen Becquerelstrahlen nur noch bei den Kathodenstrahlen findet.

9. Die Kathodenstrahlen.

§ 310. Hittorf entdeckte (1869), dass von der negativen Elektrode einer Entladungsstrecke in sehr verdünnten Gasen unsichtbare Strahlen geradlinig ausgehen, welche dort, wo sie die Glaswand des Rezipienten treffen, diese zu hellem grünen oder blauen Fluoreszenzleuchten bringen. Auch viele andere Stoffe, welche von diesen Strahlen getroffen werden, fluoreszieren lebhaft, z. B. Fett (hell saphirblau), Marmor (rot) u.s.w. Auch die Luft, welche von Kathodenstrahlen durchdrungen wird, fluoresziert blau. (Blaues Glimmlicht § 149 und 151.)

Die geradlinige Fortpflanzung der Kathodenstrahlen erkennt man an den scharfen Schatten, welche sie entwerfen können.

Die Kathodenstrahlen verlaufen in magnetischen Feldern stark krummlinig, sie werden vom Magnete abgelenkt.

Der Verfasser zeigte (1896), dass die Kathodenstrahlen

auch im elektrischen Felde krummlinig verlaufen, dass sie durch elektrostatische Wirkungen abgelenkt werden. Man kann schwache Kathodenstrahlen durch einen geriebenen Hartgummi- bezw. Glasstab, welchen man dem Rezipienten nähert in dem einen bezw. in dem entgegengesetzten Sinne ablenken und krümmen.

Bei nicht allzuhoher Verdünnung verhält sich jedoch die durchstrahlte Luft fast ganz so, wie ein (sehr schlechter) Leiter, so dass diese elektrostatischen Wirkungen auf die Kathodenstrahlen stets nur kurze Dauer haben, da sich bald die elektrostatische Schutzwirkung des leitenden Rezipientenraumes einstellt.

Bei sehr hoher Luftverdünnung können jedoch dauernde elektrostatische Ablenkungen der Kathodenstrahlen erhalten werden (J. J. Thomson, 1897).

Die Kathodenstrahlen haben entladende und auch ladende Wirkung. Sie laden einen Körper, auf welchen sie fallen, oft negativ, häufiger aber positiv.

Zu ihrer Anregung brauchen die Kathodenstrahlen kräftige elektrische Schwingungen oder gegen die Kathode geleitete elektrische Drahtwellen.

Sie sind zweifellos elektromagnetische Strahlen, und zwar longitudinale elektrische Strahlen, welche an ihrem äusseren Umfange von ringförmigen, magnetischen Wechselströmungen begleitet werden. Hieraus lässt sich auch der Umstand erklären, dass sie nur von der Kathode (nur in der Richtung der elektrischen Strömung) verlaufen und durch elektrostatische Wirkungen abgelenkt werden können.

Ihre undulatorische oder Wellennatur lässt sich durch Interferenzexperimente nachweisen. Sie haben die vergleichsweise langsame Schwingungsdauer der elektromagnetischen Drahtwellen, durch welche sie angeregt werden, und eine beträchtlich kleinere Fortpflanzungsgeschwindigkeit als das Licht. Doch mag es auch Kathodenstrahlen wesentlich kleinerer Schwingungsdauer geben, für welche aber die Interferenzexperimente noch nicht durchgeführt werden konnten.

REGISTER.